



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOGÁS EN UN VERTEDERO DE RESIDUOS NO PELIGROSOS PARA SU APROVECHAMIENTO**

Trabajo realizado por:  
*Maricel Cepeda Madariaga*

Dirigido:  
*Amaya Lobo García de Cortázar*  
*Ana López Martínez*

Titulación:  
**Grado en Ingeniería Civil,**  
**Mención en Construcciones Civiles**

Santander, febrero de 2020

**TRABAJO FIN DE GRADO**



A mi madre y hermano,  
gracias por su incondicional apoyo durante todo este tiempo.



## **AGRADECIMIENTOS**

En el presente documento quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos, a todos quienes que han contribuido en mi formación, gracias por todo el conocimiento entregado, con el cual me fue posible desarrollar el presente trabajo fin de grado.

A Dios, por estar presente en esta etapa y también en toda mi vida, ofreciéndome siempre las mejores oportunidades y en el momento más indicado.

A mi madre Berta, por el apoyo, cariño, confianza y dedicación entregada durante todos estos años, por ser mi pilar principal y estar incondicionalmente en cada una de mis decisiones para poder desarrollarme como una mejor persona.

A mi hermano Alejandro, por el cariño y la colaboración en cada etapa de mi vida, por estar siempre presente.

A Claudio, por el apoyo y el cariño durante estos últimos años de mi vida.

A mis abuelos Aurora y Raúl, por todo el apoyo y amor del mundo.

A mis compañeros con los cuales me forme en los últimos años, quienes fueron fundamentales para poder aprender y desarrollarnos mutuamente como profesionales.

A mis amigas y amigos, que me han apoyado durante toda esta etapa de mi vida.

A mis profesoras guías Amaya Lobo y Ana López, por sus constantes consejos y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo.

## **RESUMEN**

Actualmente, las emisiones de gases de efecto invernadero están afectando de una manera considerable el medio ambiente, uno de los focos más grandes son los vertederos, provocando un daño irremediable a la atmósfera. En los vertederos se puede recuperar el biogás, compuesto principalmente de metano, para aprovecharlo de diferentes maneras. Si bien existen estudios sobre las diferentes alternativas de uso del biogás en un vertedero, todavía en muchos lugares puede mejorarse su captación, y utilizarlo de forma más eficiente y responsable.

El objetivo del presente trabajo es, en primer lugar, estimar el potencial de biogás en un vertedero para su posterior aprovechamiento basado en un modelo matemático. Posteriormente se analizan sus resultados de cara al estudio de las posibles alternativas para el aprovechamiento del biogás obtenido. El caso de aplicación del estudio es un vertedero situado en el norte de España. El vertedero se inaugura en octubre de 1988 y se clausura en noviembre de 2016. Los principales residuos depositados son residuos sólidos urbanos, residuos sólidos industriales, residuos de construcción y demolición y los lodos de estaciones depuradoras de agua residual.

La metodología a utilizar para realizar la estimación es el modelo de descomposición de primer orden del Panel Intergubernamental del Cambio Climático incorporando la formulación general propuesta, pero particularizando los valores paramétricos para representar adecuadamente la realidad del vertedero estudiado. A partir del modelo creado se generan estimaciones numéricas y gráficos representativos de lo que sucede en el vertedero en un cierto periodo de años. Las estimaciones obtenidas en el modelo revelan, como era de esperar, una generación más activa en los primeros años de explotación, debido a la humedad del residuo y la incorporación continua de materia biodegradable y una disminución progresiva al irse reduciendo la biodegradabilidad del residuo depositado.

Por último, se estudian diferentes alternativas para aprovechar el biogás recuperado estimado del vertedero en un periodo de 20 años, es decir, entre los años 2021 y 2041, con el fin de generar energía eléctrica ya sea a través de microturbinas, motores de combustión interna o turbinas de gas.

Los resultados obtenidos indican que el biogás recuperado se podría aprovechar en una planta de generación eléctrica utilizando microturbinas. Se considera un caudal mínimo recuperado de biogás de 120 Nm<sup>3</sup>/h, un caudal medio de 182 Nm<sup>3</sup>/h y un caudal máximo de 264 Nm<sup>3</sup>/h.

Obteniendo una generación de potencia eléctrica mínima de 149 kW para la planta, ocupando dos microturbinas tipo C65 y una microturbina C30 para su mínimo funcionamiento durante su periodo de vida útil.

Palabras clave: vertedero, simulación, aprovechamiento, metano, biogás.

## **ABSTRACT**

Currently, greenhouse gas emissions are significantly affecting the environment, one of the biggest hotspots is landfills, causing irretrievable damage to the atmosphere. In landfills biogas can be recovered composed mainly of methane, it can be recovered to take advantage of it in different ways. While there are studies on the different alternatives of biogas use in landfills, its collection can still be improved in many places, and used more efficiently and responsibly.

The objective of this work is, first of all, to estimate the potential of biogas in a landfill for later use based on a mathematical model. Subsequently, its results are analyzed in view of the study of possible alternatives for the use of biogas obtained. The case of application of the study is a landfill located in the north of Spain. The landfill opened in October 1988 and closed in November 2016. The main waste deposited are solid urban waste, industrial solid waste, construction and demolition waste and sludge from wastewater treatment stations.

The methodology used to make the estimation is the first-order decomposition model of the Intergovernmental Panel on Climate Change incorporating the proposed general formulation, but particularizing the parametric values to adequately represent the reality of the landfill studied. From the model created numerical modifications and representative graphs of what happens in the landfill in a certain period of years were generated. The estimates obtained in the model reveal, unsurprisingly, a more active generation in the first years of operation, due to the moisture of the residue and the continuous incorporation of biodegradable matter and a progressive decrease as the biodegradability of the deposited waste is reduced.

Finally, different alternatives are studied to take advantage of the estimated recovered biogas from the landfill over a period of 20 years, i.e. between 2021 and 2041, in order to generate electricity either through microturbines, internal combustion engines or gas turbines.

The results obtained indicate that the recovered biogas could be used in a power generation plant using microturbines. A minimum biogas recovered flow rate of 120 Nm<sup>3</sup>/h, an average flow rate of 182 Nm<sup>3</sup>/h and a maximum flow rate of 264 Nm<sup>3</sup>/h is considered. Obtaining a minimum electrical power generation of 149 kW for the plant, occupying two microturbines type C65 and one microturbine C30 for minimum operation during its lifetime.

Keywords: landfill, simulation, use, methane, biogas.





## INDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	DESCRIPCIÓN DEL VERTEDERO	3
2.1.	EXPLOTACIÓN	3
2.2.	RESIDUOS	7
2.3.	CLIMA	8
3.	METODOLOGÍA	9
3.1.	PARÁMETROS DEL MODELO	9
3.1.1.	BIODEGRADABILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL RESIDUO	9
3.1.2.	VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN	11
3.1.3.	OPERACIÓN DEL VERTEDERO	14
3.1.4.	FRACCIÓN DE METANO EN EL GAS DE VERTEDERO GENERADO (F)	15
3.2.	HERRAMIENTA DE CÁLCULO.	16
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1.	ESTIMACIÓN DE METANO	20
4.2.	ESTIMACIÓN DE BIOGÁS	24
5.	ALTERNATIVAS APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS	28
5.1.	ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS	28
5.1.1.	MICROTURBINAS.	28
5.1.2.	MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	30

5.1.3.	TURBINAS DE GAS	31
5.2.	COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS.	32
5.2.1.	BIOGÁS COMPRIMIDO (BIO-GNC)	32
5.2.2.	BIOGÁS LICUADO (BIO-GNL)	33
6.	ALTERNATIVA PROPUESTA	34
7.	CONCLUSIÓN.	38
8.	REFERENCIAS.	40
9.	ANEXOS	42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Situación del vertedero estudiado ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	3
Figura 2. Plano del Vertedero estudiado en 1997 ( <i>fuentes: GIA, 2006</i> )	4
Figura 3. Sección tipo del colector de los sectores 1-4 ( <i>fuentes: GIA, 2006</i> )	5
Figura 4 Plano del Vertedero estudiado en 1997, sector 5 ( <i>fuentes: GIA, 2006</i> )	6
Figura 5. Sección tipo del colector del sector 5 ( <i>fuentes: GIA, 200</i> ))	6
Figura 6. Entrada de residuo al vertedero durante su explotación ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	7
Figura 7. Composición global media del residuo depositado ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	8
Figura 8. Metano Generado (tCH <sub>4</sub> ) en los Sectores 1-4 y Sector 5 ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	20
Figura 9. Metano Emitido (tCH <sub>4</sub> ) Sectores 1-4, Sector 5 y Total ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	22
Figura 10. Curva de Generación y Recuperación de biogás ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	25
Figura 13. Diseño Esquemático de una Microturbina ( <i>fuentes: Masters, 2004</i> )	29
Figura 14. Generador con motor para biogas ( <i>fuentes:(FEMP, 2011)</i> )	30
Figura 11. Curva de tecnologías de Aprovechamiento de Biogás y Recuperación de biogás ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	35
Figura 12. Curva de tecnologías de Aprovechamiento de Biogás y Recuperación de biogás en los años a explotar ( <i>fuentes: elaboración propia</i> )	36

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de COD propuestos en IPCC, 2006. (fuente: Pipatti and Svardal, 2006)	10
Tabla 2. Zonas climáticas consideradas para asignar la tasa de degradación en IPPC, 2006. (Fuente: Pipatti and Svardal, 2006)	12
Tabla 3. Valores típicos de la tasa de generación de metano ( $k$ , años <sup>-1</sup> ) en IPPC, 2006. (Fuente: Pipatti and Svardal, 2006)	12
Tabla 4. Parámetros adoptados en el modelo (COD, $k$ ) (fuente: elaboración propia).	13
Tabla 5. Valor de parámetro FCM en función del tipo de vertedero en IPPC, 2006. (fuente: Pipatti and Svardal, 2006)	15
Tabla 6. Flujo de Metano Generado ( $tCH_4$ ) (fuente: elaboración propia)	21
Tabla 7. Flujo de Metano Emitido ( $tCH_4$ ) (fuente: elaboración propia)	23
Tabla 8. Cantidad de Biogás recuperado con una eficiencia de captación del 50% (fuente: elaboración propia)	26
Tabla 9. Rangos típicos de flujos de Biogás ( $Nm^3/h$ )	34

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los mayores retos medio ambientales que existe en el mundo está relacionado con la gestión de residuos sólidos, por ende, es de gran importancia su destino final. El vertedero es una de las principales soluciones a este problema, que conlleva otros problemas como la emisión de gases de efecto invernadero de origen antropogénico. Éstos se relacionan principalmente con las emisiones de gas de vertedero.

El biogás o gas de vertedero es una mezcla gaseosa que se genera a partir de la digestión anaeróbica de la descomposición de materia orgánica en el interior de los vertederos (Sanchez et al., 2016). Este gas está compuesto de 50% - 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30 - 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y pequeñas cantidades de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno e hidrocarburos no-metano (Schroth et al., 2012).

El  $\text{CH}_4$  ocupa el segundo lugar en importancia de los gases de efecto invernadero después del  $\text{CO}_2$  y se considera que tiene un potencial de efecto invernadero 25 veces mayor que el  $\text{CO}_2$  (Sanchez et al., 2016). Se estima que es el responsable de un tercio de todo el calentamiento global antropogénico (Sanchez et al., 2016) y sus emisiones representan entre el 3 y el 4 % de los gases de efecto invernadero (Pipatti and Svardal, 2006).

Mediante la instalación de plantas de aprovechamiento energético del biogás generado en vertederos se consigue el doble objetivo ambiental de aprovechar la materia orgánica para generar energía y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de gases que contribuyen a provocar el efecto invernadero (Cuesta Santianes et al., 2012), las alternativas para aprovechar este gas de manera eficiente, puede ser generando energía eléctrica mediante microturbinas o como combustible para vehículos en forma de biogás comprimido o biogás licuado. El objetivo general de este trabajo es estimar el potencial de biogás en el vertedero en estudio para optimizar su aprovechamiento. Para ello se han fijado los siguientes objetivos específicos: en primer lugar, describir el vertedero y los parámetros necesarios para introducir en la herramienta “Modelo de estimación de generación de gas en el vertedero”. En segundo lugar, crear la herramienta de simulación para determinar las emisiones de metano producidas y el biogás recuperado en el vertedero. En tercer lugar, observar los gráficos obtenidos, con el fin de analizar sus resultados a lo largo del tiempo. Finalmente, estudiar distintas alternativas para aprovechar el biogás recuperado en el vertedero y así poder

obtener beneficios ambientales, económicos y de energía.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL VERTEDERO

La instalación analizada es un vertedero de residuos no peligrosos ubicado en el norte de España, cuyo periodo de explotación va desde el año 1988 hasta noviembre de 2016. Los principales residuos depositados se pueden clasificar en residuos sólidos urbanos (RSU), residuos sólidos industriales (RSI), residuos de construcción y demolición (RCD) y lodos de una estación depuradora de agua residual (EDAR). Este vertedero se diseñó para recoger los residuos de la mancomunidad en la que se localiza y se instaló sobre un antiguo meandro de un río.



**Figura 1. Situación del vertedero estudiado (fuente: elaboración propia)**

### 2.1. Explotación

El vertedero en estudio, se inauguró el 15 de octubre de 1988. Primero, comenzó a recibir residuos de 7 municipios de la Mancomunidad, con una población total aproximada de 300.000 habitantes. Después, desde el año 1998, comenzaron a verter otros 7 pueblos de otra comarca, con una población total cercana a 75.000 habitantes.

Asentado en terreno arcilloso, su extensión superficial ronda los 92.000 m<sup>2</sup> siendo su capacidad de alrededor de 1.000.000 m<sup>3</sup> (GIA, 2006). La explotación del vertedero inicialmente estaba prevista

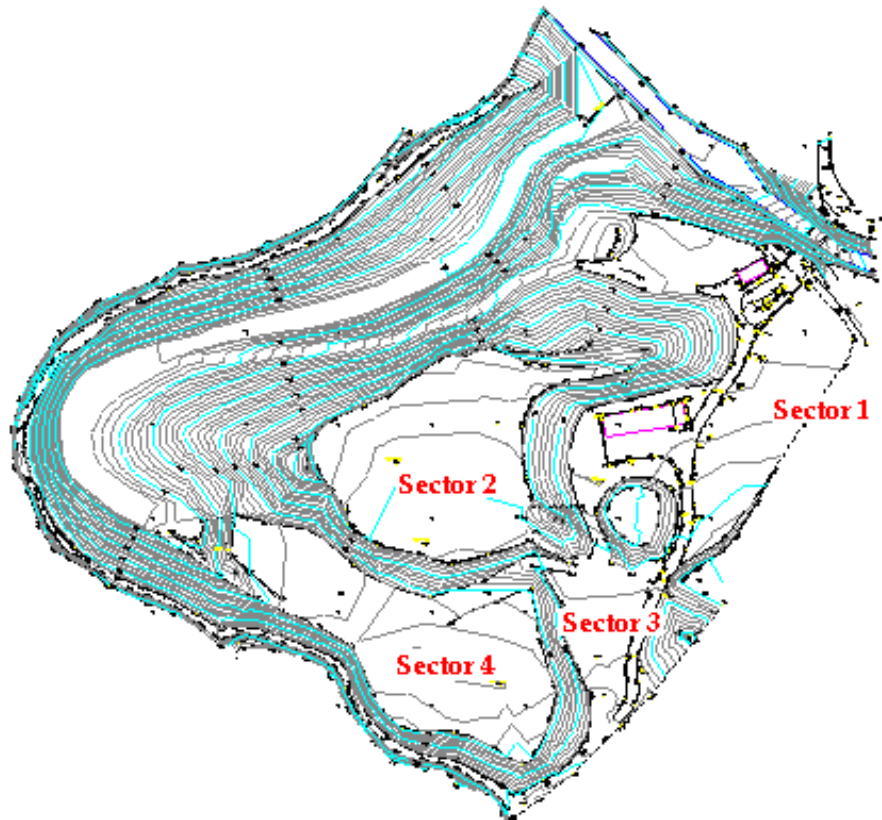
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”



en 8 fases, pero finalmente se dividió en dos, las cuales se muestran a continuación:

### **Primera fase:**

La primera fase consta de 4 sectores (1-4) no separados físicamente (Figura 2). Desde 1988 hasta 1997 el vertedero recibió los residuos de 7 municipios de la Mancomunidad rellenando los tres primeros sectores.



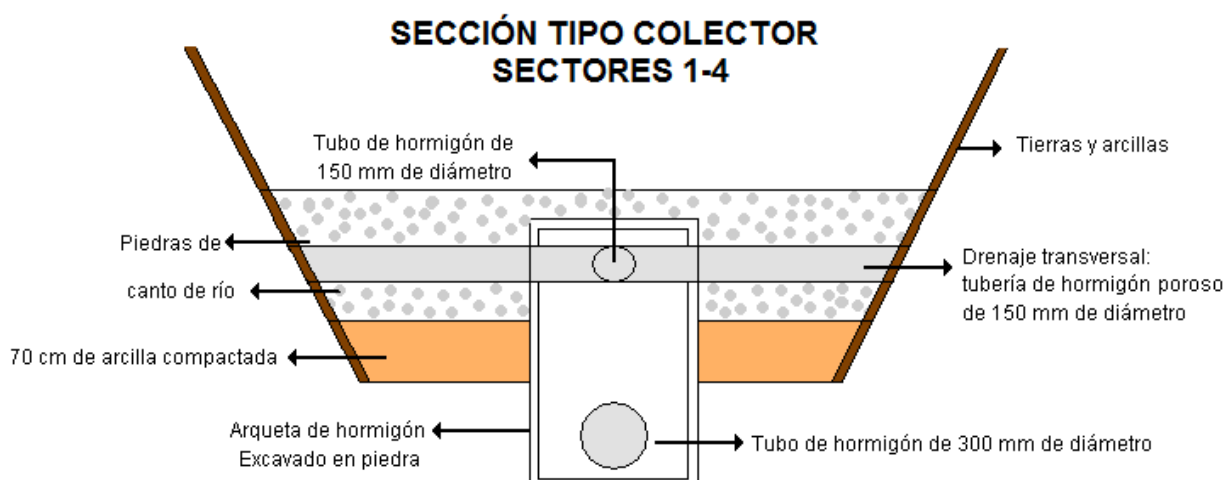
**Figura 2. Plano del Vertedero estudiado en 1997 (fuente: GIA (2006))**

En el **Sector 1** (periodo explotación 1988-1990) se vertieron tierras y varias partidas de pasta de hormigón, que fueron depositadas en forma líquida en una zona concreta. En este sector no se realizó ningún vertido de RSU por no tener una impermeabilización adecuada. El **Sector 2** recibió los RSU de la Mancomunidad entre los años 1988-1991. Y en el **Sector 3** se depositaron RCD y Escorias entre 1991 y 1997 y RSU desde 1992 hasta 1997.

Desde 1998 hasta el 2000 se recibieron además los residuos de los 7 pueblos de otra comarca, vertiendo RSU y materiales inertes en el **Sector 4**.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”

Estos 4 sectores están caracterizados por su impermeabilización de fondo y la evacuación de los lixiviados generados. La impermeabilización de los sectores 1-4 (en el fondo y los laterales) está compuesta por capas de arcilla y tierras compactadas mientras que la evacuación de lixiviados se realiza a través de un sistema de captación y recogida en forma de espina de pez. En la Figura 3 se detalla la sección del colector situado en los sectores 1-4.



**Figura 3. Sección tipo del colector de los sectores 1-4 (fuente: GIA (2006))**

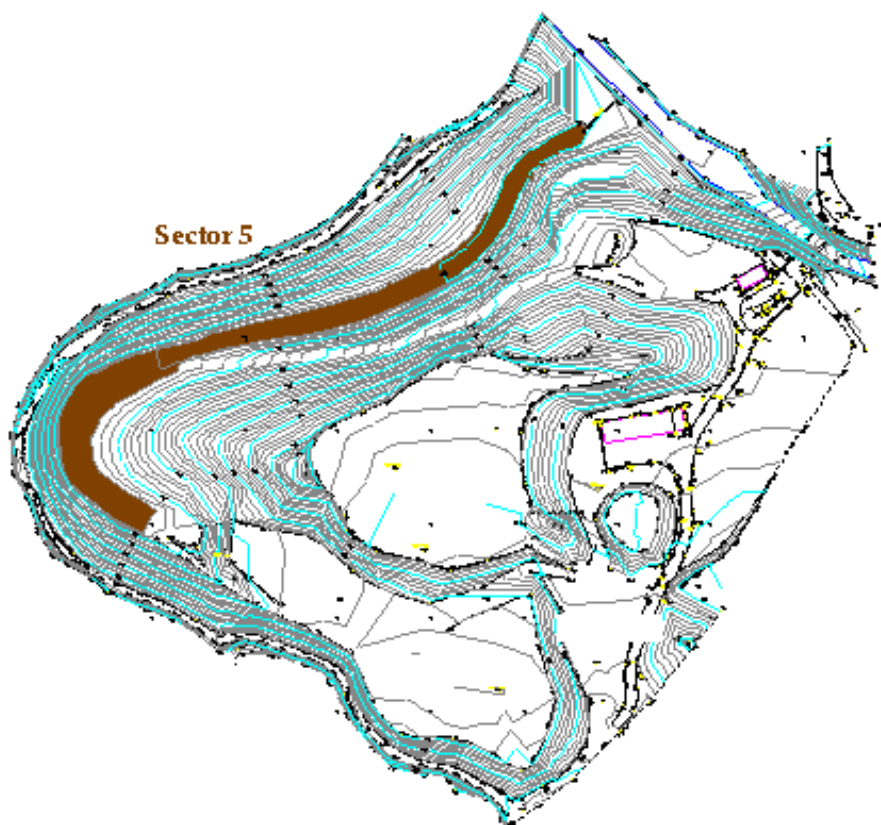
En estos cuatro sectores la impermeabilización no es buena ya que se ha comprobado que hay aportaciones de aguas subterráneas a los colectores de lixiviado. Además, al igual que hay aportaciones también puede haber salidas de lixiviado al entorno por su deficiente impermeabilización.

### **Segunda fase:**

La segunda fase consta sólo del sector 5 y se explotó desde 2001 hasta 2016 (Figura 4). En este sector vertieron los municipios de la Mancomunidad y los 7 pueblos de la otra comarca desde 2001 hasta 2007. A partir de entonces empezaron a recibir residuos de otros municipios y mancomunidades ya que en la provincia se clausuraron varios vertederos y no había más vertederos en explotación en ese periodo.

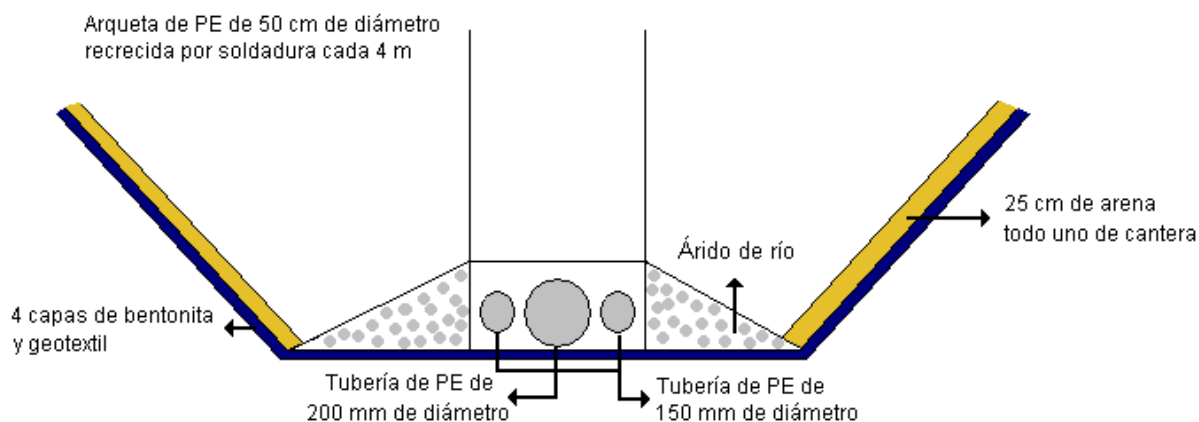
En el **Sector 5** se depositaron RSU y materiales inertes desde 2001 hasta 2016. Su impermeabilización está compuesta por unas capas de bentonita y geotextil, en los laterales se puso una capa de árido (todo uno de cantera) para permitir el drenaje de los lixiviados hasta el colector. En la Figura 5 se detalla la sección del colector situado en el sector 5. Respecto a la

evacuación de lixiviados, se realiza a través de un sistema de recogida en forma de espina de pez, con una separación entre drenajes transversales de 30 y 90 m.



**Figura 4 Plano del Vertedero estudiado en 1997, sector 5 (fuente: GIA (2006))**

## SECCIÓN TIPO COLECTOR SECTOR 5



**Figura 5. Sección tipo del colector del sector 5 (fuente: GIA (2006))**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento"

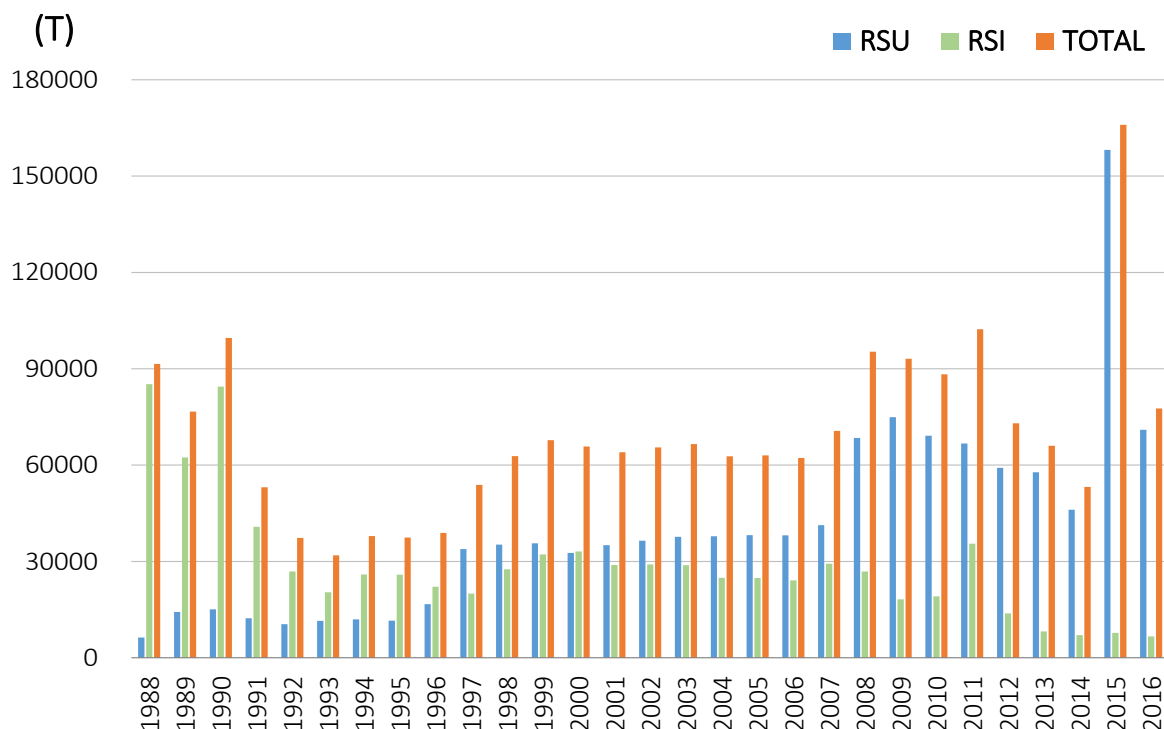
## 2.2. Residuos

El vertedero en estudio es un vertedero controlado y conforme al Real Decreto 1481/2001 (Ministerio del Medio Ambiente, 2002) se clasifica como “vertedero de residuos no peligrosos”, que pueden ser de procedencia urbana e industrial del tipo no peligroso.

El sistema de recogida de residuos urbanos actual en la zona incluye recogida selectiva de papel y cartón, vidrio, envases, residuos peligrosos y materia orgánica. También se recogen los materiales no reciclables que son los que van a vertedero. A lo largo de los años de vida del vertedero se han ido implantando las diferentes recogidas selectivas que hay actualmente. En este estudio se ha tenido en cuenta el sistema de recogida de residuos en cada momento ya que se disponía de caracterizaciones de residuos de varios municipios en épocas diferentes.

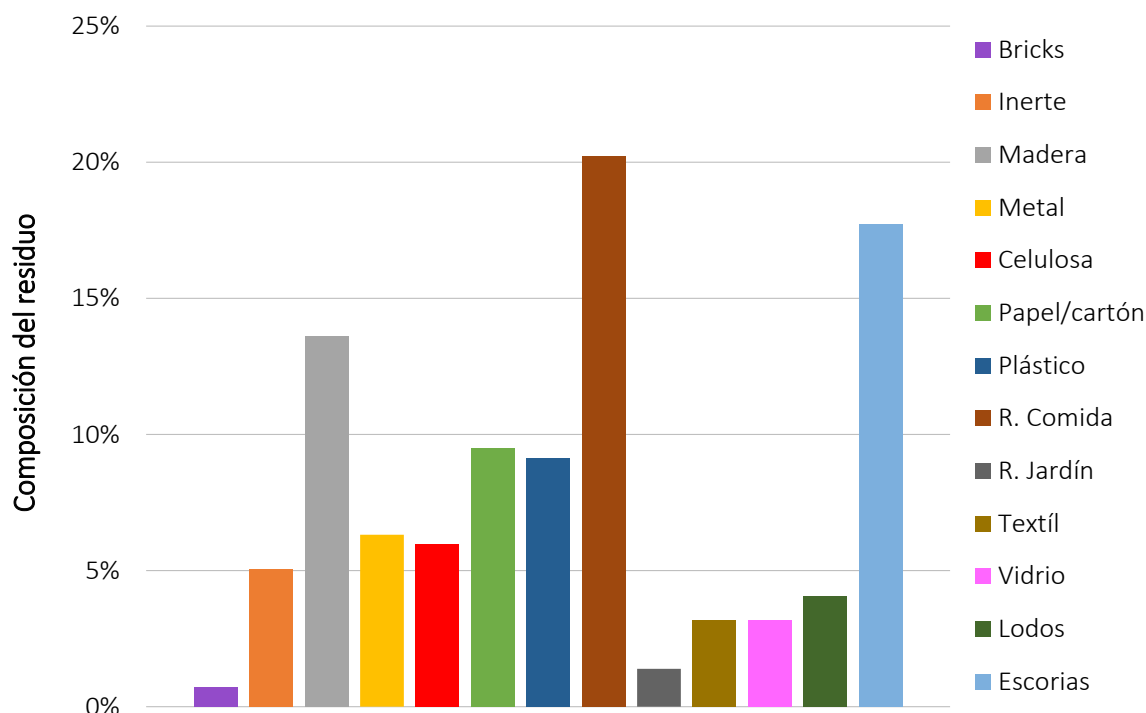
Al vertedero llegan directamente los residuos recogidos en el contenedor de no reciclables, los de limpieza viaria, lodos de depuradora, residuos industriales asimilables a urbanos, escorias y arenas procedentes de la fundición y residuos de obra (GIA, 2006). Todo el residuo depositado en el vertedero ha sido registrado en la báscula de entrada a las instalaciones.

La Figura 6 muestra la evolución de los residuos depositados en el vertedero a lo largo de la explotación del mismo y la Figura 7 la composición media de todos los residuos vertidos.



**Figura 6. Entrada de residuo al vertedero durante su explotación (fuente: elaboración propia)**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”



**Figura 7. Composición global media del residuo depositado (fuente: elaboración propia)**

### 2.3. Clima

El vertedero en estudio no cuenta con estación meteorológica propia. En este estudio se han utilizado los datos de la Estación Meteorológica más cercana al vertedero.

La región se caracteriza por un clima oceánico. Su pluviometría media es alrededor de los 1500 mm anuales; las precipitaciones máximas ocurren en otoño, las temperaturas medias anuales oscilan entre los 13 y 14°C, siendo los meses más fríos enero y febrero (AEMET, 2019).

La evapotranspiración potencial, está comprendida entre 700 y 800 mm anuales, según el cálculo con la fórmula de Thornthwaite.

### 3. METODOLOGÍA

La herramienta creada para la estimación del potencial de aprovechamiento de CH<sub>4</sub> en el vertedero estudiado está basada en el método de descomposición de primer orden (*first order decay* (FOD)) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) (Pipatti and Svardal, 2006). Esta herramienta se ha implementado para estimar el biogás que puede ser recuperado en un vertedero.

#### 3.1. Parámetros del modelo

En este apartado se describe los parámetros utilizados en el modelo y se muestran los valores empleados.

En el “Modelo de estimación de generación de gas de vertedero” se utilizaron los valores paramétricos más adecuados según las condiciones del vertedero. Cabe destacar, que el modelo puede ser aplicado a otros vertederos cambiando los valores de entrada y de los parámetros correspondientes.

Para modelizar la descomposición del residuo en el vertedero se consideraron ocho componentes orgánicos del residuo urbano, es decir, papel/cartón, textiles, residuos de alimentos, madera, residuos de parques y jardines, otros orgánicos (no alimenticios), caucho y cuero. Además, también se tuvieron en cuenta los lodos de depuradora depositados en el vertedero. Los datos de la composición y la caracterización de los residuos fueron entregados por la empresa gestora del vertedero (Figura 6 y Figura 7).

##### 3.1.1. Biodegradabilidad de los componentes del residuo

La biodegradabilidad de los componentes se representa a través de los parámetros que se describen a continuación.

##### Carbono Orgánico Degradable (COD<sub>i</sub>)

El COD<sub>i</sub> es el carbono orgánico que puede ser objeto de descomposición bioquímica (Froilan Jensen et al., 2000). Los valores adoptados en este modelo fueron los propuestos por el IPCC (2006) y que se muestran en la Tabla 1:

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”

Siguiendo la metodología del modelo CLIMA (Ministerio de la Transición Ecológica) para los lodos de EDAR se utilizó un valor de COD de 0,175 t C/ t residuo.

**Tabla 1. Valores de COD propuestos en IPCC (2006) (fuente: *Pipatti and Svardal (2006)*)**

Tipo de Residuo	COD (t C/ t residuo)
Papel	0,40
Textiles	0,24
Alimentos	0,15
Madera	0,43
Parque y jardines	0,20
Otros orgánicos (no alimenticios)	0,20
Caucho y cuero	0,39
Otros	0,00

**Fracción del COD que se degrada en el vertedero ( $COD_f$ )**

Al estimar el COD se debe considerar que en el vertedero los residuos no se van a degradar al 100% o que se degradan lentamente, ya que éstos no quedan accesibles para los microorganismos o una parte de ellos permanece seca a lo largo del tiempo. Por tanto, el  $COD_f$  representa la fracción del COD que completa su transformación en gas en el vertedero modelizado.

El  $COD_f$  varía en cada vertedero, e incluso podrían asignarse valores distintos a cada componente del residuo (Lee et al., 2017). Sin embargo, no siempre se tiene la información suficiente para determinar ese valor ya que su valor depende de diversos factores, como la temperatura, la humedad, el pH, la composición de los residuos, etc. (Pipatti and Svardal, 2006).

El valor por defecto recomendado para  $COD_f$  es de 0,5 siempre y cuando las condiciones del vertedero sean anaerobias y los valores del COD adoptados incluyan la lignina en cada material (Pipatti and Svardal, 2006). Por lo tanto, en este modelo se utilizó un factor de accesibilidad de 0,5, esto quiere decir que se supone que sólo se degradará el 50% del residuo degradable depositado.

Hay que tener en cuenta que la cantidad de COD lixiviado en los vertederos no se considera en la estimación de COD<sub>f</sub>. En general, las cantidades de COD que se pierden por lixiviación son inferiores al 10% y pueden omitirse en los cálculos (Pipatti and Svardal, 2006).

### 3.1.2. Velocidad de degradación

Por otro lado, la velocidad de degradación depende de factores asociados a la composición de los residuos y a las condiciones del vertedero.

#### Tasa de generación de metano (k)

El valor constante k de la tasa de generación de CH<sub>4</sub> está relacionado con el tiempo que tarda en descomponerse el COD presente en los residuos hasta quedar reducido a la mitad de su masa inicial (“media vida” o t<sub>1/2</sub>) (Froilan Jensen et al., 2000) cómo se indica a continuación:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (1)$$

Donde:

*k* = valor constante de la tasa de generación de metano (1/año)

*t* = año de inventario

Cuando hay valores de k altos (k=0,2) están asociados a condiciones de elevada humedad y materiales rápidamente degradables, y cuando el valor de k es menor (k=0,03), se relacionan con vertederos de residuos secos y de degradación lenta. El valor de k se aplica a un vertedero en particular, ya que esta constante tiene en cuenta una gran variedad de factores asociados a la composición de los residuos y las condiciones del vertedero.

Para la elección de la tasa de generación de metano más adecuada hay que tener en cuenta las condiciones climáticas del vertedero. En el IPCC (2006), las zonas climáticas se dividen dependiendo de los valores de la temperatura media anual (TMA), la precipitación media anual (PMA) y la evapotranspiración potencial (ETP), como se indica en la Tabla 2.

De esta manera, se recomienda utilizar los siguientes valores de k, dependiendo de dónde se encuentre el vertedero y la degradabilidad del residuo que contenga (Tabla 3).



**Tabla 2. Zonas climáticas consideradas para asignar la tasa de degradación en IPPC (2006)**  
(fuente: *Pipatti and Svardal (2006)*)

Zona		TMA	PMA/ETP	PMA
Templada	Seca	$\leq 20^{\circ}\text{C}$	$< 1$	-
	Húmeda	$\geq 20^{\circ}\text{C}$	$> 1$	-
Tropical	Seca	$> 20^{\circ}\text{C}$	-	$< 1000 \text{ mm}$
	Húmeda	$> 20^{\circ}\text{C}$	-	$\geq 1000 \text{ mm}$

**Tabla 3. Valores típicos de la tasa de generación de metano ( $k$ , años<sup>-1</sup>) en IPPC (2006)**  
(fuente: *Pipatti and Svardal (2006)*)

Tipo de Residuo	ZONA CLIMÁTICA			
	Templada		Tropical	
	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca
Papeles	0,06	0,04	0,07	0,045
Textiles	0,06	0,04	0,07	0,045
Parque y jardines	0,1	0,05	0,17	0,065
Otros orgánicos (no alimenticios)	0,1	0,05	0,17	0,065
Alimentos	0,185	0,06	0,4	0,085
Madera	0,03	0,02	0,035	0,025
Desechos brutos	0,09	0,05	0,17	0,065

Por lo tanto, de acuerdo con la clasificación propuesta por el IPCC (2006), el vertedero en estudio se encuentra en una zona templada, con una TMA de unos  $13,5^{\circ}\text{C}$ , menor que  $20^{\circ}\text{C}$  que es el límite inferior considerado para la zona tropical, y húmeda ya que la relación PMA/ETP es mayor que 1 (la PMA es de unos 1500 mm frente a unos 750 mm de ETP).

La Tabla 4 muestra los distintos valores de COD y  $k$  adoptados en el modelo creado según el tipo de residuos y las condiciones de humedad del mismo.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”

**Tabla 4. Parámetros adoptados en el modelo (COD, k) (fuente: elaboración propia).**

Tipo de Residuo	Modelo			
	COD	k (húmeda)	k (seca)	k (media)
Madera	0,43	0,03	0,02	0,025
Papel / Cartón	0,4	0,06	0,04	0,05
Residuos de alimentos	0,15	0,185	0,06	0,1225
Otros orgánicos (no alimenticios)	0,20	0,1	0,05	0,075
Textiles	0,24	0,06	0,04	0,05
Lodos de EDAR	0,175	0,185	0,06	0,1225

En el caso de k para los lodos de EDAR se han utilizado los valores de Residuos de Alimentos, debido a las condiciones similares que presentan y a la falta de información disponible.

Para crear el modelo de los residuos depositados en los sectores 1-4 se utilizaron dos valores de k. Desde 1988 hasta 2000 se aplicó el valor de la k húmeda porque son los años de explotación de esta zona del vertedero en los que se depositan los residuos y se produce la degradación. A partir del 2001 se aplicó el valor de k media ya que a partir de este año esta zona del vertedero se clausura y a medida que transcurre el tiempo, el residuo irá perdiendo humedad.

En el sector 5, se utilizó el valor de k húmeda desde 2001 hasta 2016 ya que durante esos años se depositaron los residuos en el vertedero. Desde 2017 hasta 2019 se utiliza el valor de k media ya que en el año 2017 se sella el vertedero y la humedad disminuirá exponencialmente a medida que transcurren los primeros 2 años y medio de cierre. A partir de 2020 se aplica el valor de la k seca ya que se considera que apenas hay humedad en el residuo debido al tiempo transcurrido desde el sellado y a las capas de impermeabilización que se han dispuesto sobre el vertedero.

### **Tiempo de retardo**

En la mayoría de los vertederos, los residuos sólidos se depositan de manera continuada a largo del año. Sin embargo, hay pruebas de que la producción de CH<sub>4</sub> no comienza inmediatamente después del vertido de los residuos (Pipatti and Svardal, 2006), sino que tarda un tiempo en activarse y producirse la degradación.

El IPCC (2006), propone modelizar la generación de biogás con un tiempo de retardo de 1 año, lo que implica que los residuos depositados en el vertedero comienzan a producir gas en el año siguiente al vertido (Pipatti and Svardal, 2006).

### **3.1.3. Operación del vertedero**

La explotación del vertedero debe ser correcta para que se puedan generar los gases de vertedero de una manera adecuada. Para intentar plasmar la influencia de la forma de operación de la instalación en la producción de biogás se introducen dos nuevos parámetros en la modelización de la producción del  $\text{CH}_4$ , el factor de corrección para el  $\text{CH}_4$  y el factor de oxidación.

#### **Factor de corrección para el metano (FCM)**

El factor de corrección para el  $\text{CH}_4$  permite modelizar el efecto de las zonas aeróbicas en el vertedero, donde el residuo se está degradando sin llegar a producir  $\text{CH}_4$ . Este factor representa la fracción de volumen en el vertedero en condiciones anaeróbicas.

El volumen aeróbico puede llegar a ser extenso en vertederos explotados con escaso control, sin compactación o con compactación reducida, sin cobertura o con coberturas delgadas y permeables, y en vertederos abandonados, donde la presión interna es reducida, y permite la penetración de aire (Oonk, 2010).

La generación de  $\text{CH}_4$  solo ocurre en las áreas del vertedero que presentan condiciones estrictamente anaeróbicas. El FCM es específico para cada área y debe interpretarse como el factor de corrección para la gestión del vertedero que refleja el aspecto de la gestión abarcada (Pipatti and Svardal, 2006). El IPCC (2006) propone los valores que muestra la Tabla 5.

Teniendo en cuenta las indicaciones del IPCC (2006) se propone modificar el FCM por condiciones aeróbicas para tener en cuenta la presencia de oxígeno en las reacciones del residuo en algunas zonas. En este modelo se propone utilizar siempre valores de FCM menores que 1, valores aceptados incluso en vertederos gestionados adecuadamente, por lo tanto, se utilizó 0,95 como FCM.

**Tabla 5. Valor de parámetro FCM en función del tipo de vertedero en IPPC (2006)**  
(fuente: *Pipatti and Svardal (2006)*)

Tipo de Vertedero	FCM
Gestionado anaerobio “perfecto”	1
Gestionado semi-aerobio	0,5
No gestionado (> 5 m de profundidad)	0,8
No gestionado (< 5 m de profundidad)	0,4

#### **Factor de Oxidación (OX)**

El OX refleja la cantidad de  $\text{CH}_4$  de los vertederos que se oxida en el suelo u otro material que cubra los residuos (Pipatti and Svardal, 2006). La oxidación del  $\text{CH}_4$  se produce por la acción de microorganismos metanotróficos en los suelos de la cobertura y puede variar desde valores insignificantes hasta el 100% del  $\text{CH}_4$  producido internamente. El espesor, las propiedades físicas y el contenido de humedad de los suelos de la cobertura afectan directamente la oxidación del  $\text{CH}_4$  (Bogner y Matthews, 2003).

Numerosos autores desde los años 90 han observado porcentajes de oxidación de  $\text{CH}_4$  a través de la cobertura por encima del 20%, e incluso del 55% del  $\text{CH}_4$  emitido (Chanton et al., 2011). En el IPCC (2006), se sugiere un valor para el factor de oxidación de 0 a 10% (Pipatti and Svardal, 2006). En este estudio se utilizó un OX del 10% debido que el vertedero es gestionado mediante cobertura.

#### **3.1.4. Fracción de metano en el gas de vertedero generado (F)**

El gas de vertedero está compuesto principalmente por  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Generalmente, la fracción F puede variar entre 0,4 y 0,6, dependiendo de varios factores, entre ellos la composición de los desechos (Froilan Jensen et al., 2000).

En los vertederos, la mayor parte de los residuos generan un gas de aproximadamente 50% de  $\text{CH}_4$ . Solo los materiales que incluyen cantidades sustanciales de grasa o aceite pueden generar biogás con mucho más del 50% de  $\text{CH}_4$ . Por lo tanto, el valor que se utilizó para la fracción de  $\text{CH}_4$  en el gas de vertedero generado en el modelo creado fue de 0,5 (Pipatti and Svardal, 2006).

### 3.2. Herramienta de cálculo.

Para facilitar el empleo del nuevo modelo (ecuaciones y valores paramétricos) se ha implementado en un archivo de cálculo Excel con una estructura que facilita la interpretación del modelo y sus resultados.

El archivo se estructura en 9 hojas: parámetros, componentes de los Sectores 1-4, entradas de los Sectores 1-4, Sectores 1-4, componentes Sector 5, entradas del Sector 5, Sector 5, resultados metano y resultados biogás.

#### 1. Hoja Parámetros

Incluye todos los parámetros del modelo adoptados en el modelo creado. Las fórmulas de cálculo de las hojas Sectores 1-4 y Sector 5 están vinculadas a esta, de manera que un cambio en los valores mostrados cambia directamente los resultados obtenidos.

#### 2. Hoja Componentes Sectores 1-4

Esta hoja incluye los datos de los residuos depositados al vertedero entre los años 1988 y 2000, información facilitada por la empresa gestora. Se muestran tablas con la cantidad (t) y caracterización por componentes (%) de cada residuo, clasificados en dos tablas (RSU y RSI), además, de los lodos de EDAR.

#### 3. Hoja Entradas Sectores 1-4

En esta hoja se introduce la información principal para los cálculos, cantidad de residuo depositado cada año clasificado por componentes entre los años 1988 y 2000.

#### 4. Hoja Sectores 1-4

En esta hoja se agrupan los cálculos del modelo FOD, teniendo en cuenta los parámetros propuestos para estos sectores a través de las fórmulas que se muestra a continuación:

- Cantidad de carbono biodegradable hasta gas, en las condiciones de vertido, depositado en el año T (t C).

$$A = W * COD * COD_f * FCM \quad (2)$$

*Donde:*

*A = cantidad de carbono biodegradable depositado en el año T (t C)*

*W = masa de los residuos depositado en el año T (t) (entradas)*

*COD = carbono orgánico biodegradable*

*COD<sub>f</sub>: fracción de carbono orgánico degradable*

*FCM = factor de corrección para el metano*

- Cantidad de carbono biodegradable hasta gas, en las condiciones de vertido, acumulado en el vertedero al término del año T (t C)

$$B = A + [B_{T-1} * e^{-k}] \quad (3)$$

*Donde:*

*B = cantidad de carbono biodegradable (en vertedero al término del año T) (t C)*

*A = cantidad de carbono biodegradable depositado en el año T (t C)*

*k = valor constante de la tasa de generación de metano (1/año)*

*t = año de inventario*

- Cantidad de carbono convertido en gas en el año T (t C)

$$C = B_{T-1} * [1 - e^{-k}] \quad (4)$$

*Donde:*

*C = cantidad de carbono convertido en gas en el año T (t C)*

*B = cantidad de carbono biodegradable (en vertedero al término del año T) (t C)*

*k = valor constante de la tasa de generación de metano (1/año)*

*t = año de inventario*

- Cantidad de metano generado en el año T (t CH<sub>4</sub>)

$$D = C * 16/12 * F \quad (5)$$

*Donde:*

*D = cantidad de metano generado en el año T (t C)*

*C = cantidad de carbono convertido en gas en el año T (t C)*

*16/12 = factor de conversión de peso de carbono en metano (relación entre los pesos moleculares)*

*F = fracción de metano en el gas de vertedero generado*

Obteniendo finalmente la cantidad de CH<sub>4</sub> generado en el vertedero para los sectores 1-4.

## 5. Hoja Componentes Sector 5

En esta hoja incluye los datos de los residuos depositados al vertedero entre los años 2001 y 2016, información facilitada por la empresa gestora. El residuo se clasifica en tres tablas (RSU, RSI y RCD) que, a su vez, contienen los distintos componentes que forman el residuo para poder utilizarlos en la hoja de Entrada Sector 5, además, de los lodos de EDAR.

## 6. Hoja Entradas sector 5

En esta hoja se incluye la información principal para los cálculos, cantidad de residuo depositado cada año según la clasificación de los componentes entre los años 2001 y 2016.

## 7. Hoja Sector 5

En esta hoja se concentran los cálculos del modelo FOD, teniendo en cuenta los parámetros propuestos para este sector a través de las mismas fórmulas utilizadas para los Sectores 1-4. De esta forma se obtiene finalmente la cantidad de CH<sub>4</sub> generado en el vertedero para el Sector 5.

## 8. Resultados Metano

En esta hoja aparecen en las dos primeras columnas los valores obtenidos (Metano generado) en las hojas Sectores 1-4 y Sector 5. Después se transforman estos valores en volumen de CH<sub>4</sub> bajo condiciones normales (Nm<sup>3</sup>) utilizando la fórmula (6). En las siguientes columnas se calcula el Metano Captado a través del sistema de desgasificación del vertedero considerando un valor de Eficiencia de Captación del 50%. Finalmente, con estos datos y los resultados obtenidos se calculan las cantidades emitidas de CH<sub>4</sub> con la formula (7). Esta estructura permite evaluar las cantidades derivadas de cada sector e incluye varios gráficos para una rápida visualización de los resultados.

- Ley de gases Ideales para determinar Volumen Metano (Nm<sup>3</sup>)

$$P * V = n * R * T \quad (6)$$

*Donde:*

*P = Presión (1 atm)*

*V = Volumen metano (m<sup>3</sup>)*

*n= Número de moles metano (16 g/mol)*

*R= Constante universal de los gases (0,08205746 L atm K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>)*

*T= Temperatura (273°K)*

– Cantidad de metano emitido en el año T (t CH<sub>4</sub>)

$$Emisiones\ de\ CH_4 = [\Sigma CH_4\ generado - R_T] * (1 - OX_T) \quad (7)$$

*Donde:*

*R = D = cantidad de metano generado en el año T (t C)*

*OX = factor de oxidación durante el año T*

*T = año del inventario*

## 9. Resultados Biogás

En las dos primeras columnas de esta hoja se calcula el Biogás Generado, considerando que un 50% es CH<sub>4</sub>, para luego transformarlo en Caudal de CH<sub>4</sub>. En las siguientes columnas se calcula la Recuperación de biogás estimado a través del sistema de desgasificación del vertedero (considerando un valor de eficiencia de captación del 50%).

En el siguiente apartado se valoran diferentes alternativas para aprovechar el biogás obtenido en el modelo como biogás recuperado.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Estimación de metano

De acuerdo a la herramienta de cálculo empleada para determinar el  $\text{CH}_4$  según las condiciones del vertedero se obtuvieron los siguientes resultados.

#### Metano Generado ( $\text{tCH}_4$ ):

En la Figura 8 y la Tabla 6 se recogen los resultados del flujo de  $\text{CH}_4$  generado en el vertedero desde 1988 hasta 2060 por sectores. Se observa que la generación de  $\text{CH}_4$  entre los años 1988 y 2000 en los sectores 1-4 aumenta considerablemente hasta su clausura. En el caso del sector 5, entre los años 2001 y 2016 aumenta la cantidad de  $\text{CH}_4$  hasta el cierre del vertedero. En ambos casos cuando el vertedero deja de recibir residuos disminuye la curva.

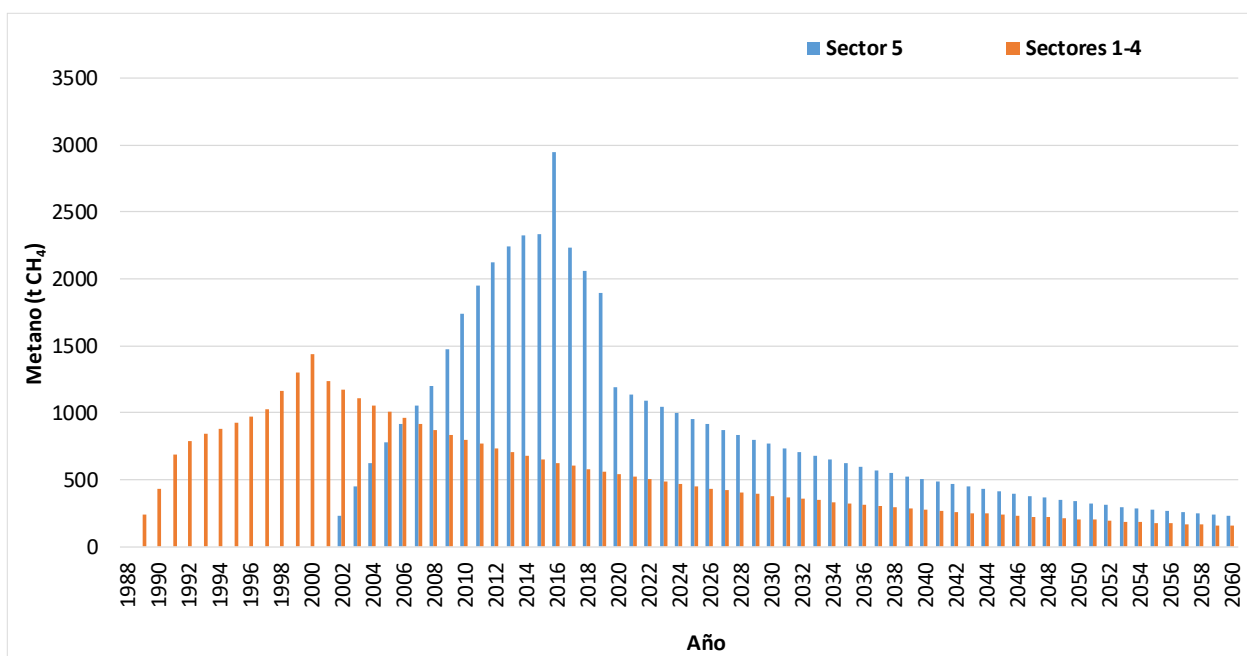


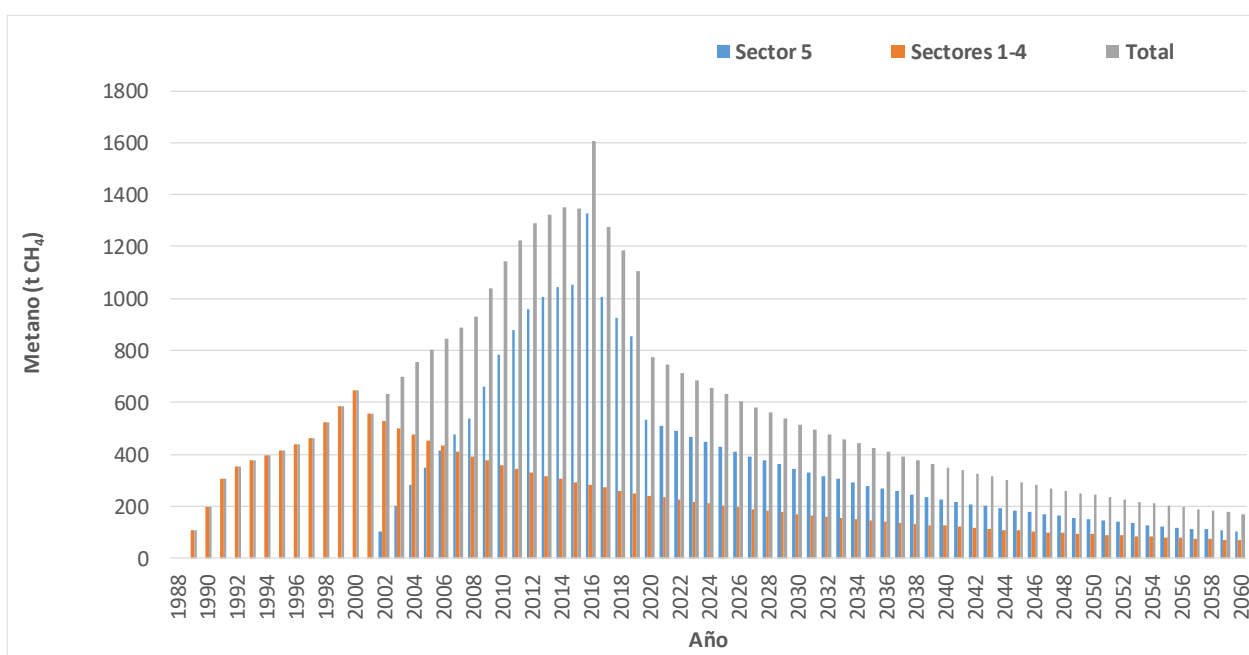
Figura 8. Metano Generado ( $\text{tCH}_4$ ) en los Sectores 1-4 y Sector 5 (fuente: elaboración propia)

**Tabla 6. Flujo de Metano Generado (tCH<sub>4</sub>) (fuente: elaboración propia)**

Metano Generado (tCH <sub>4</sub> )					
Año	Sectores1-4	Sector 5	Año	Sectores1-4	Sector 5
1988	0	0	2025	450	953
1989	243	0	2026	435	912
1990	435	0	2027	420	874
1991	684	0	2028	406	836
1992	785	0	2029	393	801
1993	839	0	2030	380	767
1994	875	0	2031	367	735
1995	923	0	2032	356	704
1996	973	0	2033	344	675
1997	1029	0	2034	333	647
1998	1164	0	2035	323	620
1999	1298	0	2036	313	595
2000	1434	0	2037	303	570
2001	1232	0	2038	294	547
2002	1169	232	2039	285	525
2003	1111	447	2040	276	503
2004	1056	625	2041	268	483
2005	1006	778	2042	259	463
2006	959	919	2043	252	445
2007	915	1055	2044	244	427
2008	874	1198	2045	237	410
2009	836	1472	2046	230	394
2010	800	1743	2047	223	378
2011	767	1950	2048	216	363
2012	735	2128	2049	210	349
2013	705	2239	2050	204	335
2014	677	2324	2051	198	322
2015	651	2336	2052	192	309
2016	626	2949	2053	187	297
2017	602	2235	2054	181	286
2018	579	2059	2055	176	275
2019	558	1899	2056	171	264
2020	538	1188	2057	166	254
2021	518	1136	2058	162	245
2022	500	1087	2059	157	235
2023	483	1040	2060	153	227
2024	466	996			

### Metano Emitido (tCH<sub>4</sub>)

La Figura 9 y la Tabla 7 muestra los resultados del flujo de CH<sub>4</sub> emitido en el vertedero desde 1988 hasta 2060 por sectores. Se observa que la emisión de CH<sub>4</sub> estimada, considerando el porcentaje de eficiencia de captación del CH<sub>4</sub> y el OX del vertedero, aumenta progresivamente entre los años 1988 y 2000 en los sectores 1-4 disminuyendo después de su clausura. En el caso del sector 5, entre los años 2001 y 2016 aumenta considerablemente la cantidad de CH<sub>4</sub> emitida hasta el cierre del vertedero. En ambos casos cuando el vertedero deja de recibir residuos la curva desciende paulatinamente.



**Figura 9. Metano Emitido (tCH<sub>4</sub>) Sectores 1-4, Sector 5 y Total (fuente: elaboración propia)**

**Tabla 7. Flujo de Metano Emitido (tCH<sub>4</sub>) (fuente: elaboración propia)**

Metano Emitido (tCH <sub>4</sub> )							
Año	Sectores1-4	Sector 5	Total	Año	Sectores1-4	Sector 5	Total
1988	0	0	0	2025	202	429	631
1989	109	0	109	2026	196	411	606
1990	196	0	196	2027	189	393	582
1991	308	0	308	2028	183	376	559
1992	353	0	353	2029	177	361	537
1993	378	0	378	2030	171	345	516
1994	394	0	394	2031	165	331	496
1995	415	0	415	2032	160	317	477
1996	438	0	438	2033	155	304	459
1997	463	0	463	2034	150	291	441
1998	524	0	524	2035	145	279	424
1999	584	0	584	2036	141	268	408
2000	645	0	645	2037	136	257	393
2001	554	0	554	2038	132	246	378
2002	526	105	631	2039	128	236	364
2003	500	201	701	2040	124	226	351
2004	475	281	757	2041	120	217	338
2005	453	350	803	2042	117	209	325
2006	432	414	845	2043	113	200	313
2007	412	475	887	2044	110	192	302
2008	393	539	933	2045	107	184	291
2009	376	662	1039	2046	103	177	281
2010	360	784	1145	2047	100	170	270
2011	345	877	1222	2048	97	163	261
2012	331	958	1288	2049	95	157	252
2013	317	1007	1325	2050	92	151	243
2014	305	1046	1350	2051	89	145	234
2015	293	1051	1344	2052	87	139	226
2016	282	1327	1609	2053	84	134	218
2017	271	1006	1277	2054	82	129	210
2018	261	926	1187	2055	79	124	203
2019	251	855	1106	2056	77	119	196
2020	242	535	777	2057	75	114	189
2021	233	511	745	2058	73	110	183
2022	225	489	714	2059	71	106	177
2023	217	468	685	2060	69	102	171
2024	210	448	658				

## 4.2. Estimación de biogás

Según los resultados de la simulación, después de la clausura del vertedero genera una gran cantidad de CH<sub>4</sub> que puede ser utilizada para su aprovechamiento. Para analizar el CH<sub>4</sub> aprovechable se tiene que calcular en primer lugar el biogás generado, después suponer una eficiencia de recuperación de ese biogás y por último calcular el biogás que se puede recuperar.

### Calculo del Biogás Generado cada año

Se obtuvo la cantidad de Biogás Generado a partir del CH<sub>4</sub> generado de acuerdo al FOD considerando un 50% de CH<sub>4</sub>.

$$\text{Biogás Generado} = \frac{[\text{CH}_4 \text{ generado}_T]}{\% \text{CH}_4} \quad (8)$$

*Donde:*

*CH<sub>4</sub> generado= cantidad de metano generado en el año T (Nm<sup>3</sup>)*

*T = año del inventario*

*%CH<sub>4</sub>= Porcentaje de metano en el Biogás*

### Eficiencia de recuperación de Biogás

La eficiencia de recuperación de biogás se estimó con el porcentaje de 50% que es una cantidad moderada y fácil de alcanzar, en el modelo se representa con el parámetro Eficiencia de Captación.

### Recuperación de Biogás Estimada

La recuperación de Biogás Estimada se determinó con la formula (9). Para facilitar el cálculo se realizó la conversión de biogás en T a Nm<sup>3</sup>/h en el modelo.

$$\text{Recuperación de Biogás Estimada} = \text{Biogas Generado} * \% \text{Eficiencia de Captación} \quad (9)$$

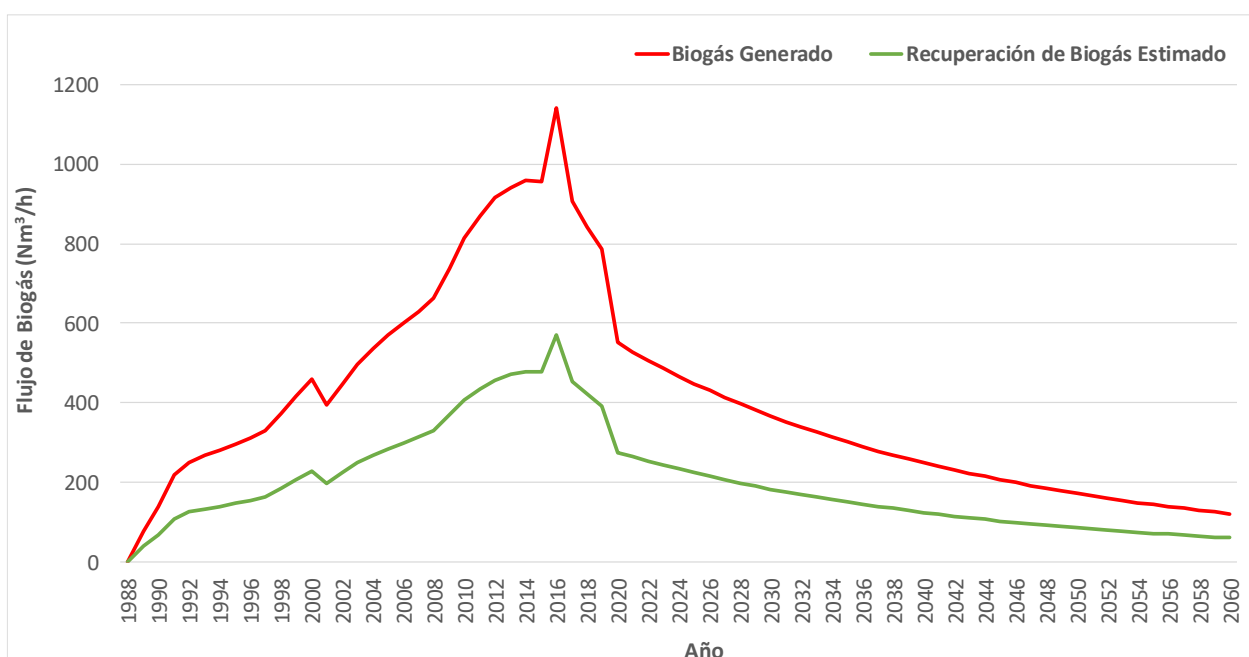
*Donde:*

*Biogás generado= cantidad de biogás generado en el año T (Nm<sup>3</sup>)*

*T = año del inventario*

*%CH<sub>4</sub>= Porcentaje de metano en el Biogás*

La Figura 10 y la Tabla 8 muestran los resultados del biogás generado y el biogás recuperado. En ella se puede observar que la generación de biogás entre los años 1988 y 2000 en los sectores 1-4 aumenta considerablemente hasta que se cierran esos sectores, entonces se puede ver una pequeña disminución en el año 2001, momento en el que se comienza a verter en el sector 5. En ese instante sigue creciendo hasta el año de la clausura del vertedero para posteriormente disminuir progresivamente la generación anual de biogás. Respecto a la Recuperación de Biogás Estimado se observa que sigue la misma tendencia que la curva de biogás generado, pero captándose sólo el 50%.



**Figura 10. Curva de Generación y Recuperación de biogás (fuente: elaboración propia)**

**Tabla 8. Cantidad de Biogás recuperado con una eficiencia de captación del 50% (fuente: elaboración propia)**

Año	Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> )		Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> /año)	Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> /h)	Recuperación de Biogás Estimado (Nm <sup>3</sup> /h)
	Sectores 1-4	Sector 5	Total	Total	Total
1988	0	0	0	0	0
1989	679126	0	679126	78	39
1990	1217279	0	1217279	139	69
1991	1916266	0	1916266	219	109
1992	2198873	0	2198873	251	126
1993	2349511	0	2349511	268	134
1994	2450091	0	2450091	280	140
1995	2583846	0	2583846	295	147
1996	2723654	0	2723654	311	155
1997	2881773	0	2881773	329	164
1998	3260416	0	3260416	372	186
1999	3636051	0	3636051	415	208
2000	4014754	0	4014754	458	229
2001	3450298	0	3450298	394	197
2002	3273536	650272	3923807	448	224
2003	3109844	1251040	4360884	498	249
2004	2957989	1750313	4708302	537	269
2005	2816868	2177665	4994533	570	285
2006	2685494	2573716	5259210	600	300
2007	2562983	2955622	5518606	630	315
2008	2448545	3354204	5802748	662	331
2009	2341468	4121441	6462909	738	369
2010	2241118	4881616	7122734	813	407
2011	2146920	5459813	7606733	868	434
2012	2058361	5959059	8017420	915	458
2013	1974978	6268380	8243358	941	471
2014	1896353	6506670	8403023	959	480
2015	1822111	6541335	8363445	955	477
2016	1751911	8258194	10010104	1143	571
2017	1685446	6258334	7943779	907	453
2018	1622438	5765203	7387641	843	422
2019	1562636	5318593	6881229	786	393
2020	1505809	3326126	4831935	552	276
2021	1451751	3181840	4633591	529	264
2022	1400273	3044260	4444533	507	254
2023	1351201	2913058	4264259	487	243

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

	Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> )		Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> /año)	Biogás Generado (Nm <sup>3</sup> /h)	Recuperación de Biogás Estimado (Nm <sup>3</sup> /h)
2024	1304379	2787922	4092301	467	234
2025	1259663	2668556	3928219	448	224
2026	1216921	2554680	3771601	431	215
2027	1176032	2446026	3622058	413	207
2028	1136885	2342342	3479228	397	199
2029	1099380	2243388	3342768	382	191
2030	1063420	2148935	3212355	367	183
2031	1028921	2058766	3087687	352	176
2032	995802	1972677	2968479	339	169
2033	963989	1890471	2854459	326	163
2034	933413	1811963	2745375	313	157
2035	904010	1736976	2640986	301	151
2036	875721	1665344	2541065	290	145
2037	848491	1596907	2445398	279	140
2038	822268	1531514	2353782	269	134
2039	797005	1469021	2266026	259	129
2040	772655	1409291	2181947	249	125
2041	749178	1352195	2101373	240	120
2042	726533	1297609	2024142	231	116
2043	704684	1245415	1950099	223	111
2044	683594	1195503	1879097	215	107
2045	663232	1147766	1810998	207	103
2046	643567	1102102	1745669	199	100
2047	624569	1058417	1682985	192	96
2048	606210	1016618	1622827	185	93
2049	588464	976619	1565083	179	89
2050	571307	938336	1509643	172	86
2051	554715	901692	1456407	166	83
2052	538665	866612	1405277	160	80
2053	523137	833023	1356160	155	77
2054	508110	800859	1308969	149	75
2055	493566	770054	1263620	144	72
2056	479485	740548	1220033	139	70
2057	465851	712281	1178132	134	67
2058	452648	685197	1137845	130	65
2059	439858	659244	1099102	125	63
2060	427467	634371	1061839	121	61

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”



## **5. ALTERNATIVAS APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS**

### **5.1. Energía eléctrica a partir de biogás**

La producción de energía eléctrica a partir del biogás, corresponde a la transformación de energía mecánica mediante microturbinas, motor de combustión o turbinas de gas. Se han elegido estas tecnologías por su compatibilidad con el biogás y su tamaño reducido

#### **5.1.1. Microturbinas.**

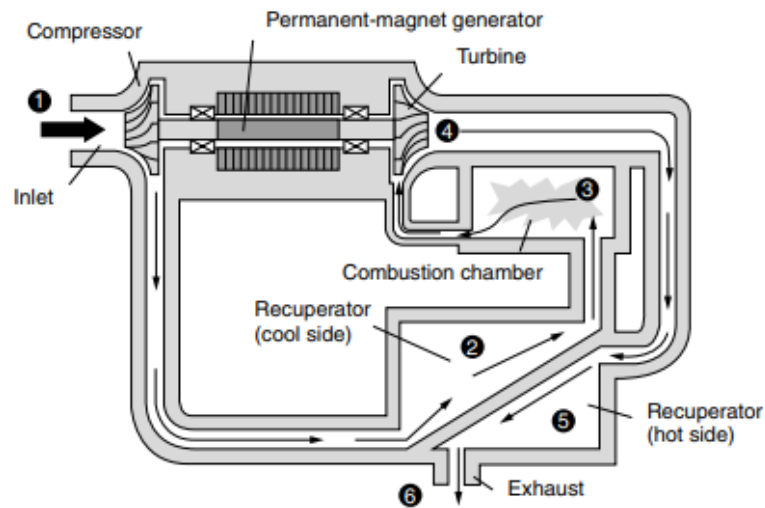
El rango de potencia eléctrica de las microturbinas está comprendido entre 30 y 200 kW (Jiménez Coloma y Gonzalez Prieto, 2010). Al tratarse de equipos modulares, que pueden conectarse en serie, son muy interesantes para aplicaciones en las que se dispone de pequeños caudales de biogás. Otra de sus características es que pueden trabajar con biogás con un contenido mínimo de CH<sub>4</sub> de hasta un 35%, lo que permite las aplicaciones con gases pobres (FEMP, 2011).

La Figura 11 muestra un esquema de una microturbina, que incluye el compresor, la turbina y el generador de imanes permanentes, en este caso todo montado en un solo eje. El aire entrante se comprime a tres o cuatro atmósferas de presión, enviadas a través de un intercambiador de calor llamado recuperador, donde su temperatura es elevada por los gases de escape calientes. Precalentando el aire comprimido entrante, el recuperador ayuda a aumentar la eficiencia de la unidad. El aire caliente y comprimido se mezcla con el combustible en la cámara de combustión, quemando y expandiendo los gases calientes a través de la turbina que hace girar el compresor y generador. El escape se libera a la atmosfera después de transferir gran parte de su calor al aire comprimido entrante en el recuperador (Masters, 2004).

En cuanto a rendimientos eléctricos, estos varían entre el 15% y el 33% en función del modelo de microturbina. No obstante, el rendimiento puede verse incrementado mediante el aprovechamiento energético de los gases de escape. En este caso, se puede llegar a obtener rendimientos de hasta el 83% (FEMP, 2011).

Otra de las ventajas de esta tecnología respecto a otras alternativas es que presentan una elevada tolerancia a la presencia de ácido sulfhídrico en el biogás, estando el límite exigido por los fabricantes alrededor de los 70.000 ppm. Este aspecto permite reducir costes en los sistemas de depuración del biogás, al disminuir la exigencia de calidad (FEMP, 2011).

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”



**Figura 11. Diseño Esquemático de una Microturbina (fuente: Masters, 2004)**

El diseño de una planta de aprovechamiento de biogás depende de diversos factores, en el caso de las microturbinas se realiza en función de la producción de biogás, lo que definirá el número de equipos a utilizar (FEMP, 2011).

A continuación, se presentan brevemente las ventajas y desventajas de las microturbinas para la obtención de **energía eléctrica** a partir de biogás.

Ventajas:

- Presentan una tolerancia elevada a la presencia de ácido sulfhídrico.
- Modularidad y reducidas emisiones atmosféricas.
- Menos partes móviles que los motores.
- Costes de mantenimiento menores.
- Aplicación en sitios de baja producción.
- Funciona con gas relativamente pobre.
- Emite bajos óxidos de nitrógeno.
- Muy funcional para añadir o eliminar unidades.
- Interconexión relativamente fácil por su baja capacidad de generación.

Desventajas:

- El biogás debe tener un contenido mínimo de  $\text{CH}_4$  del 35%.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

- Su rendimiento es inferior al de los motores.
- Inversiones específicas elevadas, debido al pequeño tamaño de las microturbinas.
- Costos de inversión más altos.
- Costos de operación y mantenimientos más altos.
- Limitada a muy bajas capacidades.

### 5.1.2. Motores de Combustión Interna

Para generar energía eléctrica el biogás, con un mínimo de un 40% de  $\text{CH}_4$ , puede ser utilizado como combustible para motores diésel y gasolina (ver Figura 12). En el caso de los motores diésel, el biogás puede reemplazar el 70 al 80% del combustible; la baja capacidad de ignición del biogás no permite reemplazar la totalidad del combustible diésel en este tipo de motores que carecen de bujía para la combustión. Aunque en los motores de gasolina el biogás puede reemplazar la totalidad de la misma, en general se le ha dado preferencia a los motores diésel, ya que trata de un motor más resistente y eficiente. El rendimiento eléctrico de estos motores oscila entre el 33% y el 37% (FEMP, 2011).

Cabe destacar que el biogás al ser utilizado como combustible para esos motores, previamente deben ser eliminadas las impurezas que pueden afectar el rendimiento y el mantenimiento de los mismos (Cuesta Santianes et al., 2012).



**Figura 12. Generador con motor para biogás (fuente: FEMP (2011))**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos  
no peligrosos para su aprovechamiento”

Como ejemplo del uso de motores de combustión interna alimentados por biogás para la producción de electricidad en España, se tiene la planta de biometanización, compostaje y aprovechamiento energético del gas del vertedero de Pinto (Madrid) (Cuesta Santianes et al., 2012).

A continuación, se presentan brevemente las ventajas y desventajas de los motores de combustión interna para la obtención de **energía eléctrica** a partir de biogás.

Ventajas:

- Gran gama comercial de equipos.
- Instalaciones modulares y transportables.
- Facilidad de vertido de energía a la red eléctrica.
- Posibilidad de aprovechamiento térmico (gases de escape a 500°C y agua caliente a 90°C).
- Su rendimiento es mayor a las microturbinas.

Desventajas:

- El biogás debe tener un contenido mínimo de CH<sub>4</sub> de 40%.
- Muy sensible a la presencia de elementos corrosivos.
- Costos de mantenimientos altos.

### 5.1.3. Turbinas de Gas

Las turbinas de gas generan electricidad a partir de biogás, este tipo de tecnología es menos contaminante debido a su buen rendimiento. Una de las ventajas de las turbinas es que requieren menor tiempo de instalación que otros sistemas equivalentes, por lo que resultan muy adecuadas para proyectos de desarrollo rápido (FEMP, 2011). A pesar del buen funcionamiento que se consigue, se deben tener en cuenta la fuerte dependencia que presentan estos sistemas en determinados parámetros, entre los cuales destacan los climáticos, como la humedad o la presión, y que condicionan tanto la potencia que la turbina es capaz de producir como su rendimiento (Cuesta Santianes et al., 2012).

Generalmente las plantas con turbinas de gas se utilizan para cubrir cargas puntuales, como sistema de respaldo o bien, si se tiene acceso a un combustible barato, para cubrir la carga base.

Los componentes básicos de una planta con turbina de biogás son: un compresor, una cámara de

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

combustión y una turbina (Quiroz and de la Cerda, 2017).

Como ejemplo del uso de turbinas de gas alimentados por biogás para la producción de electricidad en España, es el Ecoparque de La Rioja, un centro de recogida y reciclaje de RSU, compostaje y generación energética con biogás (Cuesta Santianes et al., 2012).

A continuación, se presentan brevemente las ventajas y desventajas de las turbinas de gas para la obtención de **energía eléctrica** a partir de biogás.

Ventajas:

- Prácticamente todo el calor de proceso se puede recuperar (alto rendimiento)
- Pueden operar conectados a la red eléctrica de forma continua.
- Permiten el uso de combustibles de bajo poder calorífico (biogás)

Desventajas:

- Reducido número de aplicaciones debido a las pérdidas energéticas
- Bajo rendimiento (30-35%).
- Costos de inversión altos.

## **5.2. Combustible para vehículos**

Otra opción para el aprovechamiento del biogás es la utilización del mismo como combustible para vehículos. Esta opción es una de las más adecuadas, ya que genera menos contaminación atmosférica en comparación a la generación de energía eléctrica.

En este caso se han estudiado dos alternativas, el biogás comprimido y el biogás licuado, las más utilizadas en la industria del transporte de vehículos. Para mejorar el proceso de estas tecnologías, es recomendable realizar el proceso de limpieza del biogás para eliminar sus impurezas, pero no es una opción porque esta tecnología no está tan desarrollada en España.

### **5.2.1. Biogás Comprimido (bio-GNC)**

El bio-GNC es similar al GNC (Gas Natural Comprimido), luego la producción del bio-GNC, se realiza mediante la compresión (20-25 MPa) del biogás limpio. Esta compresión se debe hacer hasta conseguir reducir el volumen de biogás, a presión atmosférica, a menos de 1% del volumen inicial

(Yang et al., 2014). Una planta típica de compresión de biogás (o GN) está compuesta generalmente por: una unidad de purificación de biogás, un compresor multi-fase y tanques de almacenamiento de alta presión. Uno de los aspectos críticos de esta tecnología es el tipo de almacenamiento, ya que afecta al tiempo de repostaje de los vehículos, a su llenado exhaustivo y al consumo energético.

El GNC es reconocido como una alternativa de combustible de transportes como la gasolina y el diésel debido a sus principales ventajas, una mayor eficiencia térmica en comparación con la gasolina y el diésel, y la disminución de las emisiones de base carbono (CO, CO<sub>2</sub>, HC) del vehículo por tener el menor ratio C/H en comparación al resto de combustibles de hidrocarburos (Yang et al., 2014).

### 5.2.2. Biogás Licuado (Bio-GNL)

El GNL (Gas Natural Licuado) es un combustible líquido de gran interés, ya que es 600 veces más eficiente que el biogás a presión atmosférica y 3 veces más que el bio-GNC en términos de espacio. El bio-GNL se considera equivalente al GNL en términos de CH<sub>4</sub> y poder calorífico. Además, el GNL se considera como posible sustituto del diésel para vehículos pesados (Yang et al., 2014).

Los métodos para la producción de bio-GNL incluyen la tecnología criogénica, licuefacción y disminución de la presión (Johansson, 2008). Debido a las pocas plantas de generación de bio-GNL existentes, es necesario utilizar un método sin limpieza previa del biogás, siendo la criogenización la tecnología más adecuada.

Existen en España varias plantas que convierten el biogás procedente del vertedero en biocombustible para ser utilizado en automoción. Por ejemplo, en el Centro de Recursos de Coll Cardús (Vacarisses-Barcelona) se ha construido una planta que trata el biogás procedente del vertedero, convirtiéndolo en biocombustible para ser utilizado en automoción. La planta tiene una capacidad de tratamiento de biogás sucio de 100 Nm<sup>3</sup>/h, suficiente para la producción de 60 Nm<sup>3</sup>/h de biogás tratado. Con esta cantidad de biogás se puede alimentar una flota de aproximadamente 35 vehículos diarios (FEMP, 2011).

A continuación, se presentan brevemente las ventajas y desventajas de la utilización del biogás como **combustible de vehículos**:

Ventajas:

- Los vehículos son más silenciosos y utilizan menos combustible que aquellos impulsados por combustibles fósiles como gasolina y diésel.
- El coste del combustible es menor que el petróleo.

Desventajas:

- Es necesario purificar el biogás para hacerlo apto como combustible.
- Autonomía del vehículo más baja debida al menor poder calorífico del biogás.
- Alto coste de depuración del biogás.
- Es necesario estaciones de servicio específicas.
- Elevada inversión en la adaptación del biogás sin obtener grandes beneficios en su aplicación.

## 6. ALTERNATIVA PROPUESTA

De las alternativas disponibles para el aprovechamiento del biogás en vertederos la más utilizada es utilizar el biogás para generar energía eléctrica. En este caso se ha decidido estudiar cuál de las tres tecnologías es la más idónea para el vertedero estudiado.

En este apartado se contemplan las necesidades de tres tecnologías diferentes para poder adoptar la más idónea para la conversión del biogás de este vertedero en energía eléctrica en función del flujo de biogás recuperado. Este ha sido considerado como el principal factor en la obtención de la potencia eléctrica mínima necesaria de una planta de generación.

La Tabla 9 señala los rangos típicos de flujo de biogás necesarios para cada tecnología estudiada, en este caso microturbinas, motores de combustión interna (MCI) y turbinas de gas.

**Tabla 9. Rangos típicos de flujos de Biogás (Nm<sup>3</sup>/h)**

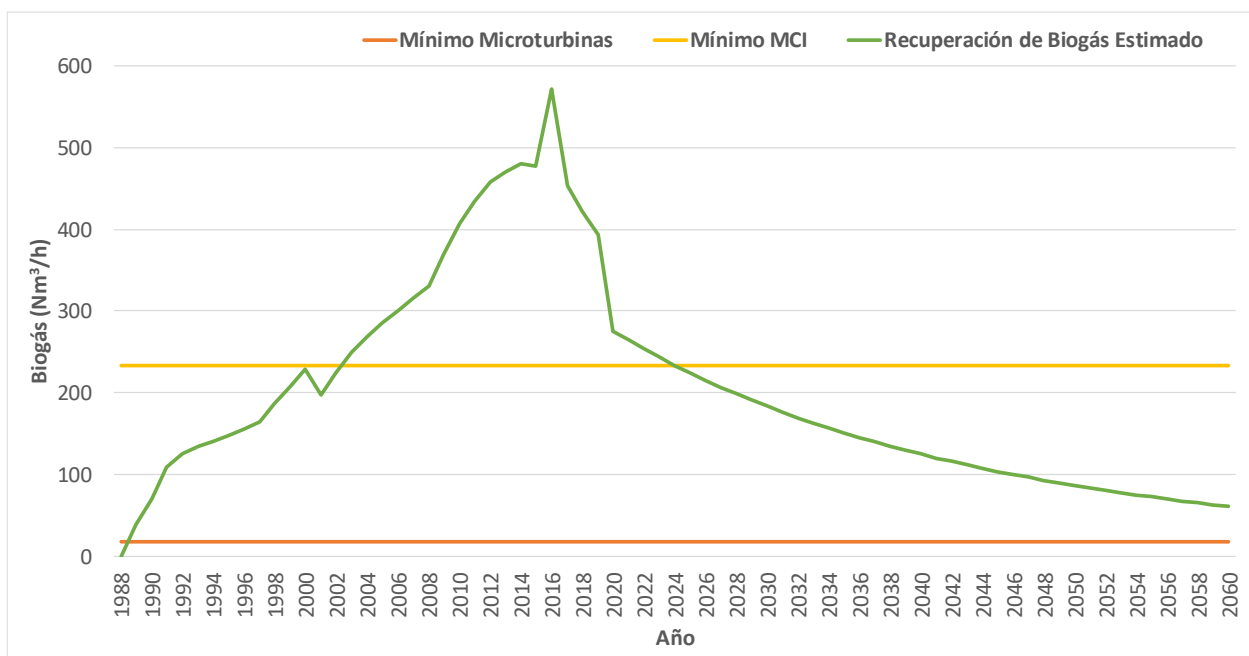
Tecnología	Rango Típico Nm <sup>3</sup> Biogás/h <sup>1</sup>	Rango Típico Nm <sup>3</sup> Biogás/h <sup>2</sup>
Microturbinas	< 169,8	> 18
Motores de combustión interna	255 a 8493,6	210 a 720
Turbinas de gas	6795 a 33975	> 2400

<sup>1</sup> (Acurio et al., 1997)

<sup>2</sup> (Christensen, 2010)

De acuerdo con estos datos, se han considerado los siguientes flujos de biogás mínimos para compararlos con los valores de la curva de “Recuperación de Biogás Estimado”: microturbinas > 18 Nm<sup>3</sup>Biogás/h, MCI > 233 Nm<sup>3</sup>Biogás/h y turbinas de gas > 4598 Nm<sup>3</sup>Biogás/h. Con esta comparación se facilita la elección de la alternativa más adecuada para el aprovechamiento de biogás.

De acuerdo a la Figura 13, se puede observar que el Biogás Recuperado se hubiera podido utilizar para la obtención de energía eléctrica mediante MCI entre 2003 y 2024, mientras que las microturbinas se pueden utilizar durante todo el periodo estudiado.

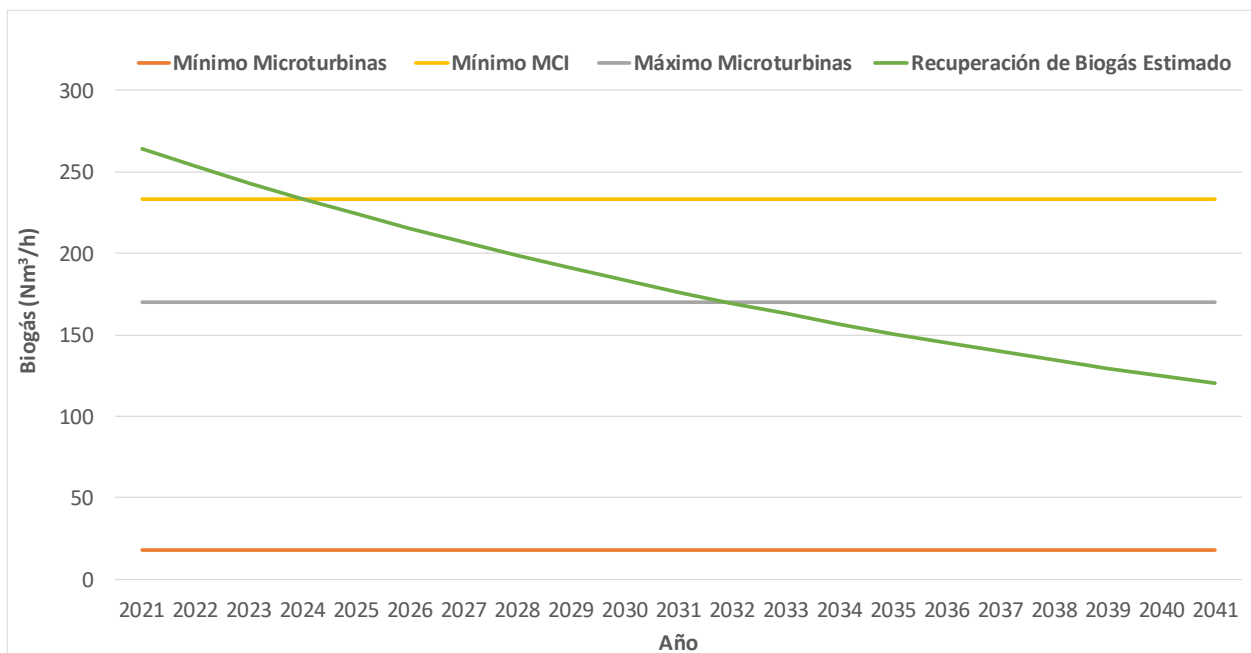


**Figura 13. Curva de tecnologías de Aprovechamiento de Biogás y Recuperación de biogás**  
(fuente: elaboración propia)

En el vertedero se podría instalar una planta de generación de energía eléctrica con una vida útil de 20 años (entre 2021 y 2041). Según la Figura 14, en estos años no se podrían utilizar los MCI porque su explotación sería sólo posible durante un periodo de 3 años y la inversión es muy alta para un tiempo tan reducido. De esta forma, las microturbinas serían la tecnología más adecuada en este caso ya que la recuperación de biogás cumple con las exigencias mínimas durante todo el periodo de explotación de la planta de generación de energía.

La Tabla 10 muestra los flujos de biogás recuperados durante el periodo útil de explotación de la planta, considerando el caudal mínimo de biogás para realizar el proyecto de 120 Nm<sup>3</sup>/h que corresponde al año 2041, el cual está entre el rango mínimo y máximo de microturbinas.





**Figura 14. Curva de tecnologías de Aprovechamiento de Biogás y Recuperación de biogás en los años a explotar (fuente: elaboración propia)**

**Tabla 10. Rangos de flujos de Biogás recuperado (Nm³/h) (fuente: elaboración propia)**

	Año	Recuperación Biogás Estimado (Nm³/h)		Año	Recuperación Biogás Estimado (Nm³/h)
0	2021	264	11	2032	169
1	2022	254	12	2033	163
2	2023	243	13	2034	157
3	2024	234	14	2035	151
4	2025	224	15	2036	145
5	2026	215	16	2037	140
6	2027	207	17	2038	134
7	2028	199	18	2039	129
8	2029	191	19	2040	125
9	2030	183	20	2041	120
10	2031	176			

De acuerdo al biogás disponible para la generación de electricidad en la planta se ha calculado el poder calorífico del biogás y la potencia generada disponible para obtener la potencia mínima generada.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento"

**Poder calorífico inferior del biogás (PCI):**

$$PCI_{biogás} = PCI_{CH_4} * \%CH_4 \quad (10)$$

$$PCI_{biogás} = 4,97 \frac{kWh}{m^3}$$

*Donde:*

$PCI_{CH_4}$ =Poder Calorífico del Metano (9,94 kWh/Nm<sup>3</sup>)

$\%CH_4$ = Porcentaje de metano en el Biogás

**Potencia generada disponible:**

$$Potencia\ generada = Caudal_{Biogás} * PCI_{Biogás} \quad (11)$$

$$Potencia\ generada = 596,4\ kW$$

*Donde:*

$Caudal_{Biogás}$  = Biogás mínimo recuperado

**Potencia eléctrica:**

Según las propuestas analizadas se ha determinado que la mejor técnica para la generación de electricidad en este caso sería con una microturbina, luego la eficiencia eléctrica sería del 25%.

$$Potencia\ Electrica = Potencia\ Generada * Eficiencia \quad (12)$$

$$Potencia\ Electrica = 149\ kW$$

*Donde:*

$Eficiencia$ = Eficiencia Microturbina

Por lo tanto, la planta propuesta generaría una potencia eléctrica mínima de 149 kW en toda su vida útil (20 años), esto teniendo en cuenta que las microturbinas realizarían su funcionamiento con un caudal mínimo recuperado de biogás de 120 Nm<sup>3</sup>/h.

Actualmente, existen varias empresas fabricantes de microturbinas, pero la más destacada es Capstone que está ubicada en Estados Unidos. Dispone de dos modelos microturbinas de 30 y 65 kW (C30 y C65) que utilizan biogás de vertedero (Capstone, 2020)

Entonces, en el caso del vertedero en estudio, se pueden utilizar dos microturbinas tipo C65 y una microturbina C30 superando la cantidad de potencia eléctrica mínima estipulada para la planta.

## 7. CONCLUSIÓN.

En este trabajo se efectuó una estimación de potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos situado en el norte de España, mediante una herramienta de simulación basada en la hoja de cálculo del modelo IPCC modificado, que permitió estimar la generación de metano en el vertedero provocada por la descomposición de los residuos entre 1988 y 2060, con el fin de obtener el biogás recuperado. Para la modelización se ha considerado un análisis detallado de los residuos depositados en los sectores del 1-4 entre los años 1988 y 2000, y el sector 5, entre los años 2001 y 2016, año en que se produce la clausura. Se utilizaron, al crear la herramienta, informaciones sobre las características del vertedero, los datos de los residuos depositados entregados por la empresa gestora y los parámetros de acuerdo al modelo de descomposición del residuo de primer orden.

De acuerdo a los resultados de  $\text{CH}_4$  obtenidos en el modelo, durante el periodo de explotación de cada sector se eleva de manera exponencial su generación. De esta forma la mayor cantidad de metano se genera en el último año en que se depositan los residuos, es decir, en el año 2000 en los sectores 1-4, con 1434 t  $\text{CH}_4$ , y en el año 2016 en el sector 5, con 2049 t  $\text{CH}_4$ .

Al sellar cada fase de explotación se ralentizan los procesos de degradación del residuo, disminuyendo la cantidad de  $\text{CH}_4$  generado paulatinamente. A pesar de este descenso después de la clausura del vertedero se espera una generación considerable que permitirá utilizarlo para su aprovechamiento.

El modelo creado está basado en una herramienta contrastada para estimar la generación de gases dentro del vertedero, pero algunos parámetros, como el de captación, que en este caso se ha supuesto del 50% como valor conservador, debería contrastarse en campo, ya que puede variar de acuerdo a la tecnología utilizada.

Finalmente se concluye que, según los resultados obtenidos en este trabajo, en el vertedero se podría utilizar el biogás para su aprovechamiento de acuerdo a distintas alternativas estudiadas. En este caso, teniendo en cuenta los rangos de trabajo, se determinó que la mejor opción son las microturbinas, con ellas se podría realizar un aprovechamiento de la generación de energía eléctrica con una vida útil de 20 años (entre 2021 y 2041).

En este período se ha obtenido un flujo de biogás mínimo de 120  $\text{Nm}^3/\text{h}$  con el modelo de simulación, lo que daría lugar a una potencia eléctrica de 149 kW. Para aprovecharla se

recomienda la utilización de dos microturbinas tipo C65 y una microturbina C30 que superan la potencia eléctrica mínima para generar electricidad en la planta.

Se recomienda realizar en un trabajo posterior, un análisis de la viabilidad económica de la propuesta, en comparación con las otras alternativas que puedan existir para el aprovechamiento de biogás en el vertedero estudiado.

Con un aprovechamiento adecuado del biogás recuperado en el vertedero se contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en España, lo cual será beneficioso para el medio ambiente.

## 8. REFERENCIAS.

- Acurio, G., Rossin, A., Paulo, T., Francisco, Z., 1997. Diagnóstico de la situación del manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe 130.
- AEMET - Agencia Estatal de Meteorología, 2019. Valores climatológicos normales. Donostia/San Sebastián, Igeldo [WWW Document]. URL <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=1024E&k=pva> (accessed 6.28.19).
- Bogner, J., Matthews, E., 2003. Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980-1996. *Global Biogeochem. Cycles* 17, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2002GB001913>
- Capstone-Capstone Turbines Corporation, 2020. Productos Microturbinas [WWW Document]. URL [www.capstoneturbine.com/products](http://www.capstoneturbine.com/products) (accessed 1.23.20).
- Chanton, J., Abichou, T., Langford, C., Hater, G., Green, R., Goldsmith, D., Swan, N., 2011. Landfill methane oxidation across climate types in the U.S. *Environ. Sci. Technol.* 45, 313–319. <https://doi.org/10.1021/es101915r>
- Christensen, T.H., 2010. *Solid Waste Technology & Management*. Vol. 2. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9780470666883>
- Cuesta Santianes, M.J., Martín Sánchez, F., Vicente Crespo, G., Villar Fernández, S., 2012. Informe de Vigilancia Tecnológica madri+d “Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento,” Informe de Vigilancia Tecnológica.
- FEMP-Federación española de municipios y provincias, 2011. Estudio del potencial de reducción de emisiones en los vertederos municipales.
- Froilan Jensen, J., Pipatti, R., Hobson, J., Johnke, B., 2000. Orientaciones del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios de gases efecto invernadero. CAPÍTULO 5: Desechos. Hayama, Japón.
- GIA - Grupo de Ingeniería Ambiental, 2006. Simulación del Vertedero de Lapatz basada en el programa Modulo. Santander, España.
- Jiménez Coloma, E., Gonzalez Prieto, E., 2010. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás.
- Johansson, N., 2008. Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology -Description of systems and evaluations of energy balances. Master thesis 92.
- Lee, U., Han, J., Wang, M., 2017. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. *J. Clean. Prod.* 166, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>
- Masters, G.M., 2004. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Renewable and Efficient
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Electric Power Systems. <https://doi.org/10.1002/0471668826>

Ministerio del Medio Ambiente, 2002. Decreto Real 1481/2001 [WWW Document]. «BOE» núm. 25, 29/01/2002. URL <https://www.boe.es/eli/es/rd/2001/12/27/1481/con> (accessed 11.4.19).

Oonk, H., 2010. Literature review: methane from landfills. Methods to quantify generation, oxidation and emission. Assendelft, Países Bajos.

Pipatti, R., Svoldal, P., 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. CAPÍTULO 3. Eliminación de desechos sólidos. Hayama, Japón.

Quiroz, H., de la Cerda, C., 2017. MÓDULO 7: Generación de Energía Eléctrica.

Sanchez, S., Narros, A., del Peso, I., de la Fuente, M.M., Rodríguez, E., 2016. Emisiones superficiales de metano en vertederos. ¿Por qué y cómo cuantificarlas?, in: CONAMA 2016. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid, España. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>

Schroth, M.H., Eugster, W., Gómez, K.E., Gonzalez-Gil, G., Niklaus, P.A., Oester, P., 2012. Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. Waste Manag. 32, 879–889. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.003>

Yang, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., Li, Y., 2014. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. Renew. Sustain. Energy Rev. 40, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.008>

## 9. ANEJOS

### ANEJO A. HOJA 1. PARAMETROS “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

Componentes del residuo	PARÁMETROS DE BIODEGRADABILIDAD			
	Carbono orgánico degradable, DOC (fracción)	Tasa de generación de metano, k (año <sup>-1</sup> )		
		Zona Húmeda	Zona Seca	Zona Media
Madera y similares	0,43	0,03	0,02	0,025
Papel / cartón	0,4	0,06	0,04	0,05
Residuos de alimentos	0,15	0,185	0,06	0,1225
Otros putrescibles orgánicos	0,2	0,1	0,05	0,075
Textiles	0,24	0,06	0,04	0,05
Rechazo de compostaje	0,2	0,185	0,06	0,1225
Lodos EDAR	0,175	0,185	0,06	0,1225
Otros	0,04	0,03	0,02	0,025

OTROS PARÁMETROS		
Denominación	Abreviatura	Valor
Factor de accesibilidad	DOCf	0,5
Factor de corrección condiciones anaeróbicas	MCF	0,95
Proporción de metano en biogas generado	F	0,5
Factor de oxidación	OX	0,1

Eficiencia de Captación	0,5
-------------------------	-----

## ANEJO B. HOJA 2. COMPONENTES SECTORES 1-4 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO												
RSU	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bricks	90,0	204,1	210,9	176,3	149,1	147,3	149,1	140,5	211,5	457,5	469,9	470,2	431,0
Inerte	133,4	302,6	312,7	261,4	221,1	218,4	221,1	208,2	313,6	678,3	696,7	697,1	638,9
Madera	991,3	2248,3	2323,0	1941,8	1642,6	1622,9	1642,6	1547,0	2329,6	5039,1	5175,9	5179,1	4746,7
Metal	479,6	1087,8	1123,9	939,5	794,7	785,2	794,7	748,4	1127,1	2437,9	2504,2	2505,7	2296,5
Pañales y Celulosa	351,2	796,5	823,0	688,0	581,9	575,0	581,9	548,1	825,3	1785,3	1833,8	1834,9	1681,7
Papel/ Cartón	1073,1	2433,9	2514,7	2102,1	1778,1	1756,8	1778,1	1674,7	2521,9	5455,0	5603,1	5606,6	5138,5
Plástico	762,8	1730,1	1787,6	1494,3	1264,0	1248,8	1264,0	1190,4	1792,7	3877,7	3983,0	3985,4	3652,7
Residuos de comida	1685,5	3822,8	3949,8	3301,7	2792,9	2759,4	2792,9	2630,3	3961,0	8568,0	8800,7	8806,1	8071,0
Residuos de Jardín	83,7	189,9	196,2	164,0	138,7	137,0	138,7	130,6	196,7	425,5	437,1	437,3	400,8
Textil	200,8	455,4	470,5	393,3	332,7	328,7	332,7	313,3	471,8	1020,6	1048,3	1049,0	961,4
Vidrio	433,7	983,5	1016,2	849,5	718,6	709,9	718,6	676,7	1019,1	2204,4	2264,3	2265,6	2076,5

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO												
RSI	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bricks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inerte	3077,2	1986,6	2898,9	1161,1	689,1	328,9	501,8	605,8	407,9	497,2	543,9	699,6	703,0
Madera	38715,6	24993,7	36472,1	14608,1	8669,5	4138,1	6312,9	7622,1	5131,4	6255,0	6843,1	8802,1	8844,3
Metal	13883,2	8962,6	13078,7	5238,4	3108,9	1483,9	2263,8	2733,3	1840,1	2243,0	2453,9	3156,4	3171,5
Pañales y Celulosa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Papel/ Cartón	6726,9	4342,7	6337,1	2538,2	1506,4	719,0	1096,9	1324,4	891,6	1086,8	1189,0	1529,4	1536,7
Plástico	6798,5	4388,9	6404,5	2565,2	1522,4	726,7	1108,6	1338,5	901,1	1098,4	1201,7	1545,7	1553,1
Residuos de comida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residuos de Jardín	787,2	508,2	741,6	297,0	176,3	84,1	128,4	155,0	104,3	127,2	139,1	179,0	179,8
Textil	787,2	508,2	741,6	297,0	176,3	84,1	128,4	155,0	104,3	127,2	139,1	179,0	179,8

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”



Vidrio	787,2	508,2	741,6	297,0	176,3	84,1	128,4	155,0	104,3	127,2	139,1	179,0	179,8
--------	-------	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO												
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Lodos	0,0	0,0	361,0	0,0	38,0	1.213,0	1.542,0	1.758,0	1.922,0	1.851,0	2.401,0	2.746,0	2.524,0
Escorias	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

### ANEJO C. HOJA 3. ENTRADAS SECTORES 1-4 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO ”

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO												
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bricks	90	204	211	176	149	147	149	140	212	458	470	470	431
Madera y similares	39707	27242	38795	16550	10312	5761	7955	9169	7461	11294	12019	13981	13591
Papel / cartón	7868	6930	9010	4773	3396	2586	2987	3104	3572	6885	7145	7489	6998
Residuos de alimentos	1686	3823	3950	3302	2793	2759	2793	2630	3961	8568	8801	8806	8071
Otros putrescibles orgánicos	871	698	938	461	315	221	267	286	301	553	576	616	581
Textiles	1339	1760	2035	1378	1091	988	1043	1016	1402	2933	3021	3063	2823
Rechazo de compostaje	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lodos EDAR	0	0	361	0	38	1213	1542	1758	1922	1851	2401	2746	2524
Otros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## ANEJO D. HOJA 4. SECTORES 1-4 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

	Papel / Cartón					Textiles				
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
Año	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
1988	7867,6	1494,8	1494,8	0,0	0,0	1339,2	152,7	152,7	0,0	0,0
1989	6929,7	1316,6	2724,4	87,1	58,0	1760,1	200,7	344,4	8,9	5,9
1990	9010,0	1711,9	4277,7	158,7	105,8	2035,1	232,0	556,4	20,1	13,4
1991	4772,5	906,8	4935,3	249,1	166,1	1378,3	157,1	681,1	32,4	21,6
1992	3396,3	645,3	5293,2	287,4	191,6	1090,9	124,4	765,8	39,7	26,4
1993	2586,3	491,4	5476,4	308,3	205,5	987,8	112,6	833,8	44,6	29,7
1994	2986,9	567,5	5725,0	318,9	212,6	1043,0	118,9	904,1	48,6	32,4
1995	3104,4	589,8	5981,4	333,4	222,3	1016,4	115,9	967,4	52,7	35,1
1996	3572,1	678,7	6311,8	348,3	232,2	1401,5	159,8	1070,8	56,3	37,6
1997	6884,9	1308,1	7252,3	367,6	245,0	2933,1	334,4	1342,8	62,4	41,6
1998	7144,6	1357,5	8187,5	422,3	281,6	3021,2	344,4	1609,0	78,2	52,1
1999	7488,6	1422,8	9133,5	476,8	317,9	3062,8	349,2	1864,5	93,7	62,5
2000	6998,5	1329,7	9931,3	531,9	354,6	2822,9	321,8	2077,7	108,6	72,4
2001		0,0	9447,0	484,4	322,9		0,0	1976,4	101,3	67,6
2002		0,0	8986,2	460,7	307,2		0,0	1880,0	96,4	64,3
2003		0,0	8548,0	438,3	292,2		0,0	1788,3	91,7	61,1
2004		0,0	8131,1	416,9	277,9		0,0	1701,1	87,2	58,1
2005		0,0	7734,5	396,6	264,4		0,0	1618,1	83,0	55,3
2006		0,0	7357,3	377,2	251,5		0,0	1539,2	78,9	52,6
2007		0,0	6998,5	358,8	239,2		0,0	1464,1	75,1	50,0

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2008		0,0	6657,2	341,3	227,5		0,0	1392,7	71,4	47,6
2009		0,0	6332,5	324,7	216,4		0,0	1324,8	67,9	45,3
2010		0,0	6023,6	308,8	205,9		0,0	1260,2	64,6	43,1
2011		0,0	5729,9	293,8	195,9		0,0	1198,7	61,5	41,0
2012		0,0	5450,4	279,4	186,3		0,0	1140,3	58,5	39,0
2013		0,0	5184,6	265,8	177,2		0,0	1084,7	55,6	37,1
2014		0,0	4931,7	252,9	168,6		0,0	1031,8	52,9	35,3
2015		0,0	4691,2	240,5	160,3		0,0	981,4	50,3	33,5
2016		0,0	4462,4	228,8	152,5		0,0	933,6	47,9	31,9
2017		0,0	4244,8	217,6	145,1		0,0	888,0	45,5	30,4
2018		0,0	4037,8	207,0	138,0		0,0	844,7	43,3	28,9
2019		0,0	3840,8	196,9	131,3		0,0	803,5	41,2	27,5
2020		0,0	3653,5	187,3	124,9		0,0	764,3	39,2	26,1
2021		0,0	3475,3	178,2	118,8		0,0	727,1	37,3	24,9
2022		0,0	3305,8	169,5	113,0		0,0	691,6	35,5	23,6
2023		0,0	3144,6	161,2	107,5		0,0	657,9	33,7	22,5
2024		0,0	2991,3	153,4	102,2		0,0	625,8	32,1	21,4
2025		0,0	2845,4	145,9	97,3		0,0	595,3	30,5	20,3
2026		0,0	2706,6	138,8	92,5		0,0	566,2	29,0	19,4
2027		0,0	2574,6	132,0	88,0		0,0	538,6	27,6	18,4
2028		0,0	2449,0	125,6	83,7		0,0	512,4	26,3	17,5
2029		0,0	2329,6	119,4	79,6		0,0	487,4	25,0	16,7
2030		0,0	2216,0	113,6	75,7		0,0	463,6	23,8	15,8
2031		0,0	2107,9	108,1	72,0		0,0	441,0	22,6	15,1

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2032		0,0	2005,1	102,8	68,5		0,0	419,5	21,5	14,3
2033		0,0	1907,3	97,8	65,2		0,0	399,0	20,5	13,6
2034		0,0	1814,3	93,0	62,0		0,0	379,6	19,5	13,0
2035		0,0	1725,8	88,5	59,0		0,0	361,1	18,5	12,3
2036		0,0	1641,6	84,2	56,1		0,0	343,4	17,6	11,7
2037		0,0	1561,6	80,1	53,4		0,0	326,7	16,7	11,2
2038		0,0	1485,4	76,2	50,8		0,0	310,8	15,9	10,6
2039		0,0	1413,0	72,4	48,3		0,0	295,6	15,2	10,1
2040		0,0	1344,1	68,9	45,9		0,0	281,2	14,4	9,6
2041		0,0	1278,5	65,6	43,7		0,0	267,5	13,7	9,1
2042		0,0	1216,2	62,4	41,6		0,0	254,4	13,0	8,7
2043		0,0	1156,8	59,3	39,5		0,0	242,0	12,4	8,3
2044		0,0	1100,4	56,4	37,6		0,0	230,2	11,8	7,9
2045		0,0	1046,8	53,7	35,8		0,0	219,0	11,2	7,5
2046		0,0	995,7	51,1	34,0		0,0	208,3	10,7	7,1
2047		0,0	947,1	48,6	32,4		0,0	198,2	10,2	6,8
2048		0,0	900,9	46,2	30,8		0,0	188,5	9,7	6,4
2049		0,0	857,0	43,9	29,3		0,0	179,3	9,2	6,1
2050		0,0	815,2	41,8	27,9		0,0	170,5	8,7	5,8
2051		0,0	775,5	39,8	26,5		0,0	162,2	8,3	5,5
2052		0,0	737,6	37,8	25,2		0,0	154,3	7,9	5,3
2053		0,0	701,7	36,0	24,0		0,0	146,8	7,5	5,0
2054		0,0	667,4	34,2	22,8		0,0	139,6	7,2	4,8
2055		0,0	634,9	32,6	21,7		0,0	132,8	6,8	4,5

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2056		0,0	603,9	31,0	20,6		0,0	126,3	6,5	4,3
2057		0,0	574,5	29,5	19,6		0,0	120,2	6,2	4,1
2058		0,0	546,5	28,0	18,7		0,0	114,3	5,9	3,9
2059		0,0	519,8	26,7	17,8		0,0	108,7	5,6	3,7
2060		0,0	494,5	25,4	16,9		0,0	103,4	5,3	3,5

Año	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
1988	1685,5	120,1	120,1	0,0	0,0	39706,9	8110,1	8110,1	0,0	0,0
1989	3822,8	272,4	372,2	20,3	13,5	27242,0	5564,2	13434,6	239,7	159,8
1990	3949,8	281,4	590,7	62,9	41,9	38795,0	7923,9	20961,4	397,1	264,7
1991	3301,7	235,2	726,2	99,8	66,5	16549,9	3380,3	23722,3	619,5	413,0
1992	2792,9	199,0	802,6	122,7	81,8	10312,1	2106,2	25127,4	701,1	467,4
1993	2759,4	196,6	863,6	135,5	90,4	5761,0	1176,7	25561,5	742,6	495,1
1994	2792,9	199,0	916,7	145,9	97,2	7955,5	1624,9	26430,9	755,5	503,6
1995	2630,3	187,4	949,3	154,8	103,2	9169,1	1872,8	27522,6	781,2	520,8
1996	3961,0	282,2	1071,2	160,3	106,9	7461,0	1523,9	28233,0	813,4	542,3
1997	8568,0	610,5	1500,8	180,9	120,6	11294,1	2306,8	29705,4	834,4	556,3
1998	8800,7	627,1	1874,3	253,5	169,0	12019,0	2454,9	31282,4	877,9	585,3
1999	8806,1	627,4	2185,2	316,6	211,0	13981,1	2855,6	33213,5	924,5	616,4
2000	8071,0	575,1	2391,2	369,1	246,0	13591,0	2776,0	35007,9	981,6	654,4
2001		0,0	2115,5	275,7	183,8		0,0	34143,5	864,3	576,2
2002		0,0	1871,6	243,9	162,6		0,0	33300,5	843,0	562,0
2003		0,0	1655,8	215,8	143,9		0,0	32478,3	822,2	548,1
2004		0,0	1464,9	190,9	127,3		0,0	31676,4	801,9	534,6
2005		0,0	1296,0	168,9	112,6		0,0	30894,3	782,1	521,4
2006		0,0	1146,6	149,4	99,6		0,0	30131,6	762,8	508,5
2007		0,0	1014,4	132,2	88,1		0,0	29387,6	744,0	496,0
2008		0,0	897,4	117,0	78,0		0,0	28662,0	725,6	483,7
2009		0,0	794,0	103,5	69,0		0,0	27954,4	707,7	471,8

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2010		0,0	702,4	91,5	61,0		0,0	27264,2	690,2	460,1
2011		0,0	621,4	81,0	54,0		0,0	26591,0	673,2	448,8
2012		0,0	549,8	71,6	47,8		0,0	25934,5	656,5	437,7
2013		0,0	486,4	63,4	42,3		0,0	25294,1	640,3	426,9
2014		0,0	430,3	56,1	37,4		0,0	24669,6	624,5	416,3
2015		0,0	380,7	49,6	33,1		0,0	24060,5	609,1	406,1
2016		0,0	336,8	43,9	29,3		0,0	23466,5	594,1	396,0
2017		0,0	298,0	38,8	25,9		0,0	22887,1	579,4	386,3
2018		0,0	263,6	34,4	22,9		0,0	22322,0	565,1	376,7
2019		0,0	233,2	30,4	20,3		0,0	21770,9	551,1	367,4
2020		0,0	206,3	26,9	17,9		0,0	21233,3	537,5	358,3
2021		0,0	182,6	23,8	15,9		0,0	20709,1	524,3	349,5
2022		0,0	161,5	21,0	14,0		0,0	20197,8	511,3	340,9
2023		0,0	142,9	18,6	12,4		0,0	19699,1	498,7	332,5
2024		0,0	126,4	16,5	11,0		0,0	19212,7	486,4	324,2
2025		0,0	111,8	14,6	9,7		0,0	18738,4	474,4	316,2
2026		0,0	98,9	12,9	8,6		0,0	18275,7	462,7	308,4
2027		0,0	87,5	11,4	7,6		0,0	17824,5	451,2	300,8
2028		0,0	77,4	10,1	6,7		0,0	17384,4	440,1	293,4
2029		0,0	68,5	8,9	6,0		0,0	16955,2	429,2	286,1
2030		0,0	60,6	7,9	5,3		0,0	16536,5	418,6	279,1
2031		0,0	53,6	7,0	4,7		0,0	16128,3	408,3	272,2



	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2032		0,0	47,4	6,2	4,1		0,0	15730,1	398,2	265,5
2033		0,0	42,0	5,5	3,6		0,0	15341,7	388,4	258,9
2034		0,0	37,1	4,8	3,2		0,0	14962,9	378,8	252,5
2035		0,0	32,9	4,3	2,9		0,0	14593,5	369,4	246,3
2036		0,0	29,1	3,8	2,5		0,0	14233,1	360,3	240,2
2037		0,0	25,7	3,4	2,2		0,0	13881,7	351,4	234,3
2038		0,0	22,7	3,0	2,0		0,0	13539,0	342,7	228,5
2039		0,0	20,1	2,6	1,7		0,0	13204,7	334,3	222,9
2040		0,0	17,8	2,3	1,5		0,0	12878,7	326,0	217,4
2041		0,0	15,8	2,1	1,4		0,0	12560,7	318,0	212,0
2042		0,0	13,9	1,8	1,2		0,0	12250,6	310,1	206,7
2043		0,0	12,3	1,6	1,1		0,0	11948,1	302,5	201,6
2044		0,0	10,9	1,4	0,9		0,0	11653,1	295,0	196,7
2045		0,0	9,7	1,3	0,8		0,0	11365,4	287,7	191,8
2046		0,0	8,5	1,1	0,7		0,0	11084,8	280,6	187,1
2047		0,0	7,6	1,0	0,7		0,0	10811,1	273,7	182,5
2048		0,0	6,7	0,9	0,6		0,0	10544,2	266,9	178,0
2049		0,0	5,9	0,8	0,5		0,0	10283,8	260,3	173,6
2050		0,0	5,2	0,7	0,5		0,0	10029,9	253,9	169,3
2051		0,0	4,6	0,6	0,4		0,0	9782,3	247,6	165,1
2052		0,0	4,1	0,5	0,4		0,0	9540,8	241,5	161,0
2053		0,0	3,6	0,5	0,3		0,0	9305,2	235,6	157,0

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$B = A + (\text{BT}-1 * \text{exp1})$	$C = \text{BT}-1 * (1 - \text{exp1})$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2054		0,0	3,2	0,4	0,3		0,0	9075,5	229,7	153,2
2055		0,0	2,8	0,4	0,2		0,0	8851,4	224,1	149,4
2056		0,0	2,5	0,3	0,2		0,0	8632,8	218,5	145,7
2057		0,0	2,2	0,3	0,2		0,0	8419,7	213,1	142,1
2058		0,0	2,0	0,3	0,2		0,0	8211,8	207,9	138,6
2059		0,0	1,7	0,2	0,2		0,0	8009,1	202,8	135,2
2060		0,0	1,5	0,2	0,1		0,0	7811,3	197,7	131,8

	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	B = A + (BT-1 * exp1)	C = BT-1 * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
Año	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
1988	870,9	82,7	82,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	698,0	66,3	141,2	7,9	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	937,7	89,1	216,8	13,4	9,0	361,0	30,0	30,0	0,0	0,0
1991	461,0	43,8	240,0	20,6	13,8	0,0	0,0	24,9	5,1	3,4
1992	315,0	29,9	247,1	22,8	15,2	38,0	3,2	23,9	4,2	2,8
1993	221,2	21,0	244,6	23,5	15,7	1213,0	100,8	120,7	4,0	2,7
1994	267,1	25,4	246,7	23,3	15,5	1542,0	128,2	228,5	20,4	13,6
1995	285,6	27,1	250,3	23,5	15,6	1758,0	146,1	336,0	38,6	25,7
1996	301,1	28,6	255,1	23,8	15,9	1922,0	159,8	439,0	56,8	37,8
1997	552,7	52,5	283,3	24,3	16,2	1851,0	153,9	518,7	74,2	49,4
1998	576,2	54,7	311,1	27,0	18,0	2401,0	199,6	630,7	87,6	58,4
1999	616,3	58,5	340,1	29,6	19,7	2746,0	228,3	752,5	106,5	71,0
2000	580,7	55,2	362,9	32,4	21,6	2524,0	209,8	835,2	127,1	84,7
2001		0,0	336,6	26,2	17,5		0,0	738,9	96,3	64,2
2002		0,0	312,3	24,3	16,2		0,0	653,7	85,2	56,8
2003		0,0	289,8	22,6	15,0		0,0	578,3	75,4	50,2
2004		0,0	268,8	20,9	14,0		0,0	511,7	66,7	44,5
2005		0,0	249,4	19,4	12,9		0,0	452,7	59,0	39,3
2006		0,0	231,4	18,0	12,0		0,0	400,5	52,2	34,8
2007		0,0	214,7	16,7	11,1		0,0	354,3	46,2	30,8
2008		0,0	199,1	15,5	10,3		0,0	313,5	40,8	27,2

Año	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * \frac{DOC}{DOC_f * MCF}$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$	W	$A = W * \frac{DOC}{DOC_f * MCF}$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2010		0,0	171,4	13,3	8,9		0,0	245,3	32,0	21,3
2011		0,0	159,0	12,4	8,3		0,0	217,1	28,3	18,9
2012		0,0	147,5	11,5	7,7		0,0	192,0	25,0	16,7
2013		0,0	136,9	10,7	7,1		0,0	169,9	22,1	14,8
2014		0,0	127,0	9,9	6,6		0,0	150,3	19,6	13,1
2015		0,0	117,8	9,2	6,1		0,0	133,0	17,3	11,6
2016		0,0	109,3	8,5	5,7		0,0	117,6	15,3	10,2
2017		0,0	101,4	7,9	5,3		0,0	104,1	13,6	9,0
2018		0,0	94,1	7,3	4,9		0,0	92,1	12,0	8,0
2019		0,0	87,3	6,8	4,5		0,0	81,5	10,6	7,1
2020		0,0	81,0	6,3	4,2		0,0	72,1	9,4	6,3
2021		0,0	75,1	5,9	3,9		0,0	63,8	8,3	5,5
2022		0,0	69,7	5,4	3,6		0,0	56,4	7,4	4,9
2023		0,0	64,7	5,0	3,4		0,0	49,9	6,5	4,3
2024		0,0	60,0	4,7	3,1		0,0	44,2	5,8	3,8
2025		0,0	55,6	4,3	2,9		0,0	39,1	5,1	3,4
2026		0,0	51,6	4,0	2,7		0,0	34,6	4,5	3,0
2027		0,0	47,9	3,7	2,5		0,0	30,6	4,0	2,7
2028		0,0	44,4	3,5	2,3		0,0	27,0	3,5	2,3
2029		0,0	41,2	3,2	2,1		0,0	23,9	3,1	2,1
2030		0,0	38,2	3,0	2,0		0,0	21,2	2,8	1,8

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * \frac{DOC}{DOC_f * MCF}$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$	W	$A = W * \frac{DOC}{DOC_f * MCF}$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2031		0,0	35,5	2,8	1,8		0,0	18,7	2,4	1,6
2032		0,0	32,9	2,6	1,7		0,0	16,6	2,2	1,4
2033		0,0	30,5	2,4	1,6		0,0	14,7	1,9	1,3
2034		0,0	28,3	2,2	1,5		0,0	13,0	1,7	1,1
2035		0,0	26,3	2,0	1,4		0,0	11,5	1,5	1,0
2036		0,0	24,4	1,9	1,3		0,0	10,2	1,3	0,9
2037		0,0	22,6	1,8	1,2		0,0	9,0	1,2	0,8
2038		0,0	21,0	1,6	1,1		0,0	7,9	1,0	0,7
2039		0,0	19,5	1,5	1,0		0,0	7,0	0,9	0,6
2040		0,0	18,1	1,4	0,9		0,0	6,2	0,8	0,5
2041		0,0	16,8	1,3	0,9		0,0	5,5	0,7	0,5
2042		0,0	15,5	1,2	0,8		0,0	4,9	0,6	0,4
2043		0,0	14,4	1,1	0,7		0,0	4,3	0,6	0,4
2044		0,0	13,4	1,0	0,7		0,0	3,8	0,5	0,3
2045		0,0	12,4	1,0	0,6		0,0	3,4	0,4	0,3
2046		0,0	11,5	0,9	0,6		0,0	3,0	0,4	0,3
2047		0,0	10,7	0,8	0,6		0,0	2,6	0,3	0,2
2048		0,0	9,9	0,8	0,5		0,0	2,3	0,3	0,2
2049		0,0	9,2	0,7	0,5		0,0	2,1	0,3	0,2
2050		0,0	8,5	0,7	0,4		0,0	1,8	0,2	0,2
2051		0,0	7,9	0,6	0,4		0,0	1,6	0,2	0,1
2052		0,0	7,3	0,6	0,4		0,0	1,4	0,2	0,1
2053		0,0	6,8	0,5	0,4		0,0	1,3	0,2	0,1

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * \frac{DOC^*}{DOCf^*} * MCF$	$B = A + (BT-1^* \cdot exp1)$	$C = BT-1^* (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$	W	$A = W * \frac{DOC^*}{DOCf^*} * MCF$	$B = A + (BT-1^* \cdot exp1)$	$C = BT-1^* (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2054		0,0	6,3	0,5	0,3		0,0	1,1	0,1	0,1
2055		0,0	5,9	0,5	0,3		0,0	1,0	0,1	0,1
2056		0,0	5,4	0,4	0,3		0,0	0,9	0,1	0,1
2057		0,0	5,0	0,4	0,3		0,0	0,8	0,1	0,1
2058		0,0	4,7	0,4	0,2		0,0	0,7	0,1	0,1
2059		0,0	4,3	0,3	0,2		0,0	0,6	0,1	0,1
2060		0,0	4,0	0,3	0,2		0,0	0,5	0,1	0,0

## ANEJO E. HOJA 5. COMPONENTES SECTOR 5 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO							
RSU	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Bricks	363,2	379,1	396,1	402,8	405,4	442,2	477,9	1015,4
Inerte	152,7	161,0	168,4	169,5	172,7	286,4	313,5	824,9
Madera	400,9	422,6	441,9	444,9	453,3	543,8	564,4	652,4
Metal	1033,0	1066,6	1114,0	1144,4	1136,7	1140,9	1204,3	1987,2
Pañales y Celulosa	5042,8	5217,4	5449,8	5587,8	5564,1	4690,5	4898,2	6857,2
Papel/ Cartón	5771,2	5984,9	6252,2	6396,1	6387,2	5207,9	5680,6	9208,4
Plástico	5044,9	5249,8	5485,2	5592,9	5608,7	5207,9	5483,6	8552,9
Residuos de comida	10141,9	10457,8	10921,6	11234,8	11140,7	12381,3	13241,6	25779,6
Residuos de Jardín	639,1	661,8	691,3	708,2	705,9	767,2	806,8	1253,4
Textil	1552,4	1587,0	1656,7	1718,4	1686,0	2390,7	2533,8	4556,1
Vidrio	1787,2	1863,2	1947,0	1981,6	1991,8	1361,5	1470,7	3116,3

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO							
RSU	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Bricks	1227,7	1167,8	1102,0	528,7	571,6	458,8	1424,6	629,2
Inerte	1102,0	976,3	928,1	2022,3	2413,9	1973,4	7091,5	3099,3
Madera	499,8	405,7	394,5	321,1	303,8	234,7	1872,2	3300,5
Metal	2164,7	1993,6	1890,1	1476,9	1361,1	1051,0	4416,8	2906,3
Pañales y Celulosa	6888,8	6424,7	6085,6	6489,3	6187,1	4778,2	18368,0	9147,1
Papel/ Cartón	9779,3	8829,2	8397,8	5334,6	5237,0	4062,5	14436,9	6242,6
Plástico	9003,8	8371,2	7932,5	6100,0	5875,9	4545,6	16966,6	10115,3
Residuos de comida	29672,9	26646,3	25338,7	24784,2	24374,2	19107,6	69902,7	21884,2
Residuos de Jardín	1278,7	1106,7	1059,2	1463,8	1794,8	1498,6	4559,3	1499,0
Textil	5365,4	5144,2	4844,9	2949,3	2608,2	1918,3	7696,7	4185,3
Vidrio	3714,5	3445,1	3262,1	2497,8	2482,7	1985,1	6783,5	3550,0

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO							
RSI	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
TOTAL	14159,24	13888,28	6.902	5.496	5.882	6.156	5.737	4.800
Bricks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inerte	604,6	593,0	294,7	234,7	251,1	262,8	245,0	205,0
Madera	7656,7	7510,2	3732,1	2971,9	3180,5	3328,7	3102,2	2595,8
Metal	2752,8	2700,1	1341,8	1068,5	1143,5	1196,7	1115,3	933,2
Pañales y Celulosa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Papel/ Cartón	1324,4	1299,0	645,5	514,0	550,1	575,8	536,6	449,0
Plástico	1339,5	1313,9	652,9	519,9	556,4	582,4	542,7	454,1
Residuos de comida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residuos de Jardín	161,8	158,7	78,8	62,8	67,2	70,3	65,5	54,8
Textil	161,8	158,7	78,8	62,8	67,2	70,3	65,5	54,8
Vidrio	157,7	154,7	76,9	61,2	65,5	68,6	63,9	53,5

RSI	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TOTAL	3.339	3.102	2.425	2.018	1.951	2.066	2.028	1.949
Bricks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inerte	142,6	132,5	103,5	86,2	83,3	88,2	86,6	83,2
Madera	1805,4	1677,6	1311,1	1091,3	1055,3	1117,4	1096,5	1054,2
Metal	649,1	603,1	471,4	392,4	379,4	401,7	394,2	379,0
Pañales y Celulosa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Papel/ Cartón	312,3	290,2	226,8	188,8	182,5	193,3	189,7	182,3
Plástico	315,9	293,5	229,4	190,9	184,6	195,5	191,8	184,4
Residuos de comida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residuos de Jardín	38,1	35,4	27,7	23,1	22,3	23,6	23,2	22,3
Textil	38,1	35,4	27,7	23,1	22,3	23,6	23,2	22,3
Vidrio	37,2	34,6	27,0	22,5	21,7	23,0	22,6	21,7



CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO							
RCD	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
TOTAL	0	0	4.588	4.002	3.723	3.924	5.177	4.437
Bricks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inerte	0,0	0,0	3670,7	3201,5	2978,7	3139,4	4142,0	3549,7
Madera	0,0	0,0	413,0	360,2	335,1	353,2	466,0	399,3
Metal	0,0	0,0	229,4	200,1	186,2	196,2	258,9	221,9
Pañales y Celulosa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Papel/ Cartón	0,0	0,0	68,8	60,0	55,9	58,9	77,7	66,6
Plástico	0,0	0,0	183,5	160,1	148,9	157,0	207,1	177,5
Residuos de comida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residuos de Jardín	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Textil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vidrio	0,0	0,0	22,9	20,0	18,6	19,6	25,9	22,2

CLASIFICACIÓN	TONELADAS SEGÚN AÑO							
RCD	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TOTAL	3.557	6.052	21.403	2.899	1.636	3.112	3.755	3.291
Bricks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Inerte	2845,4	4841,2	17122,2	2319,1	1308,6	2489,6	3004,1	2633,1
Madera	320,1	544,6	1926,2	260,9	147,2	280,1	338,0	296,2
Metal	177,8	302,6	1070,1	144,9	81,8	155,6	187,8	164,6
Pañales y Celulosa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Papel/ Cartón	53,4	90,8	321,0	43,5	24,5	46,7	56,3	49,4
Plástico	142,3	242,1	856,1	116,0	65,4	124,5	150,2	131,7
Residuos de comida	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Residuos de Jardín	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Textil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Vidrio	17,8	30,3	107,0	14,5	8,2	15,6	18,8	16,5

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

	TONELADAS SEGÚN AÑO							
CLASIFICACIÓN	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Lodos	3.135,7	3.435,5	3.180,1	2.467,2	2.957,2	3.693,4	4.648,3	4.675,0
Escorias	14.759,3	15.164,4	17.345,3	15.417,3	15.227,1	14.050,5	18.390,7	17.624,0

	TONELADAS SEGÚN AÑO							
CLASIFICACIÓN	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Lodos	4.222,3	4.647,5	5.511,6	5.191,9	4.569,3	4.516,6	4.606,7	4.423,8
Escorias	11.322,7	9.976,7	11.737,5	8.920,7	4.660,4	1.903,4	2.005,7	1.399,3

## ANEJO F. HOJA 6. ENTRADAS SECTOR 5 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

Clasificación	TONELADAS SEGÚN AÑO															
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Bricks	363	379	396	403	405	442	478	1015	1228	1168	1102	529	572	459	1425	629
Madera y similares	8058	7933	4587	3777	3969	4226	4133	3648	2625	2628	3632	1673	1506	1632	3307	4651
Papel / cartón	7368	7568	7264	7272	7297	6174	6653	10486	11066	10086	9772	5963	5873	4647	15751	6946
Residuos de alimentos	10142	10458	10922	11235	11141	12381	13242	25780	29673	26646	25339	24784	24374	19108	69903	21884
Otros putrescibles orgánicos	801	820	770	771	773	838	872	1308	1317	1142	1087	1487	1817	1522	4582	1521
Textiles	6757	6963	7185	7369	7317	7152	7498	11468	12292	11604	10958	9462	8818	6720	26088	13355
Rechazo de compostaje	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lodos EDAR	3136	3435	3180	2467	2957	3693	4648	4675	4222	4647	5512	5192	4569	4517	4607	4424
Otros	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## ANEJO F. HOJA 7. SECTOR 5 “MODELO DE ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN DE GAS EN EL VERTEDERO”

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2001	7368,0	1399,9	1399,9	0,0	0,0	6.757	770,3	770,3	0,0	0,0
2002	7568,2	1438,0	2756,4	81,5	54,3	6.963	793,8	1519,2	44,9	29,9
2003	7263,7	1380,1	3975,9	160,5	107,0	7.185	819,1	2249,9	88,5	59,0
2004	7272,3	1381,7	5126,1	231,5	154,4	7.369	840,1	2958,9	131,0	87,3
2005	7297,2	1386,5	6214,1	298,5	199,0	7.317	834,2	3620,8	172,3	114,9
2006	6174,2	1173,1	7025,3	361,9	241,3	7.152	815,3	4225,2	210,9	140,6
2007	6653,3	1264,1	7880,3	409,1	272,7	7.498	854,7	4833,9	246,1	164,0
2008	10485,5	1992,2	9413,6	458,9	305,9	11.468	1307,4	5859,7	281,5	187,7
2009	11065,7	2102,5	10967,9	548,2	365,5	12.292	1401,3	6919,8	341,2	227,5
2010	10086,0	1916,3	12245,5	638,7	425,8	11.604	1322,9	7839,7	403,0	268,7
2011	9772,1	1856,7	13389,1	713,1	475,4	10.958	1249,2	8632,4	456,6	304,4
2012	5963,4	1133,0	13742,4	779,7	519,8	9.462	1078,6	9208,3	502,7	335,1
2013	5872,8	1115,8	14058,0	800,3	533,5	8.818	1005,2	9677,3	536,3	357,5
2014	4646,5	882,8	14122,1	818,7	545,8	6.720	766,1	9879,8	563,6	375,7
2015	15751,4	2992,8	16292,5	822,4	548,3	26.088	2974,0	12278,5	575,4	383,6
2016	6946,2	1319,8	16663,4	948,8	632,5	13.355	1522,4	13085,9	715,0	476,7
2017		0,0	15850,8	812,7	541,8		0,0	12447,7	638,2	425,5
2018		0,0	15077,7	773,1	515,4		0,0	11840,6	607,1	404,7
2019		0,0	14342,4	735,3	490,2		0,0	11263,1	577,5	385,0
2020		0,0	13780,0	562,4	374,9		0,0	10821,5	441,6	294,4

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	$A = W * DOC$ $* DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC$ $* DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2021		0,0	13239,7	540,3	360,2		0,0	10397,2	424,3	282,9
2022		0,0	12720,5	519,1	346,1		0,0	9989,5	407,7	271,8
2023		0,0	12221,8	498,8	332,5		0,0	9597,8	391,7	261,1
2024		0,0	11742,5	479,2	319,5		0,0	9221,5	376,3	250,9
2025		0,0	11282,1	460,4	307,0		0,0	8859,9	361,6	241,1
2026		0,0	10839,7	442,4	294,9		0,0	8512,5	347,4	231,6
2027		0,0	10414,7	425,0	283,4		0,0	8178,7	333,8	222,5
2028		0,0	10006,3	408,4	272,2		0,0	7858,0	320,7	213,8
2029		0,0	9614,0	392,4	261,6		0,0	7549,9	308,1	205,4
2030		0,0	9237,0	377,0	251,3		0,0	7253,9	296,0	197,4
2031		0,0	8874,8	362,2	241,5		0,0	6969,4	284,4	189,6
2032		0,0	8526,8	348,0	232,0		0,0	6696,1	273,3	182,2
2033		0,0	8192,5	334,3	222,9		0,0	6433,6	262,6	175,0
2034		0,0	7871,3	321,2	214,2		0,0	6181,3	252,3	168,2
2035		0,0	7562,6	308,6	205,8		0,0	5939,0	242,4	161,6
2036		0,0	7266,1	296,5	197,7		0,0	5706,1	232,9	155,2
2037		0,0	6981,2	284,9	189,9		0,0	5482,3	223,7	149,2
2038		0,0	6707,4	273,7	182,5		0,0	5267,4	215,0	143,3
2039		0,0	6444,4	263,0	175,3		0,0	5060,8	206,5	137,7
2040		0,0	6191,7	252,7	168,5		0,0	4862,4	198,4	132,3
2041		0,0	5949,0	242,8	161,9		0,0	4671,7	190,7	127,1
2042		0,0	5715,7	233,3	155,5		0,0	4488,6	183,2	122,1
2043		0,0	5491,6	224,1	149,4		0,0	4312,6	176,0	117,3

Año	Papel / Cartón					Textiles				
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2044		0,0	5276,3	215,3	143,6		0,0	4143,5	169,1	112,7
2045		0,0	5069,4	206,9	137,9		0,0	3981,0	162,5	108,3
2046		0,0	4870,6	198,8	132,5		0,0	3824,9	156,1	104,1
2047		0,0	4679,6	191,0	127,3		0,0	3674,9	150,0	100,0
2048		0,0	4496,1	183,5	122,3		0,0	3530,8	144,1	96,1
2049		0,0	4319,8	176,3	117,5		0,0	3392,4	138,4	92,3
2050		0,0	4150,5	169,4	112,9		0,0	3259,4	133,0	88,7
2051		0,0	3987,7	162,7	108,5		0,0	3131,6	127,8	85,2
2052		0,0	3831,4	156,4	104,2		0,0	3008,8	122,8	81,9
2053		0,0	3681,1	150,2	100,2		0,0	2890,8	118,0	78,7
2054		0,0	3536,8	144,3	96,2		0,0	2777,4	113,3	75,6
2055		0,0	3398,1	138,7	92,5		0,0	2668,5	108,9	72,6
2056		0,0	3264,9	133,2	88,8		0,0	2563,9	104,6	69,8
2057		0,0	3136,8	128,0	85,3		0,0	2463,4	100,5	67,0
2058		0,0	3013,8	123,0	82,0		0,0	2366,8	96,6	64,4
2059		0,0	2895,7	118,2	78,8		0,0	2274,0	92,8	61,9
2060		0,0	2782,1	113,5	75,7		0,0	2184,8	89,2	59,4

Año	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * DOC$ $* DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC$ $* DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2001	10.142	722,6	722,6	0,0	0,0	8.058	1645,8	1645,8	0,0	0,0
2002	10.458	745,1	1345,7	122,0	81,4	7.933	1620,3	3217,4	48,6	32,4
2003	10.922	778,2	1896,6	227,3	151,5	4.587	936,9	4059,2	95,1	63,4
2004	11.235	800,5	2376,7	320,3	213,5	3.777	771,5	4710,7	120,0	80,0
2005	11.141	793,8	2769,1	401,4	267,6	3.969	810,7	5382,1	139,2	92,8
2006	12.381	882,2	3183,6	467,7	311,8	4.226	863,1	6086,2	159,1	106,0
2007	13.242	943,5	3589,3	537,7	358,5	4.133	844,1	6750,4	179,9	119,9
2008	25.780	1836,8	4819,9	606,2	404,1	3.648	745,0	7295,9	199,5	133,0
2009	29.673	2114,2	6120,0	814,1	542,7	2.625	536,2	7616,5	215,6	143,8
2010	26.646	1898,5	6984,9	1033,6	689,1	2.628	536,7	7928,1	225,1	150,1
2011	25.339	1805,4	7610,6	1179,7	786,5	3.632	741,8	8435,6	234,3	156,2
2012	24.784	1765,9	8091,1	1285,4	856,9	1.673	341,8	8528,1	249,3	166,2
2013	24.374	1736,7	8461,2	1366,5	911,0	1.506	307,7	8583,7	252,0	168,0
2014	19.108	1361,4	8393,5	1429,1	952,7	1.632	333,4	8663,4	253,7	169,1
2015	69.903	4980,6	11956,5	1417,6	945,1	3.307	675,4	9082,7	256,0	170,7
2016	21.884	1559,3	11496,3	2019,4	1346,3	4.651	949,9	9764,2	268,4	179,0
2017		0,0	10170,9	1325,5	883,6		0,0	9523,1	241,1	160,7
2018		0,0	8998,2	1172,6	781,8		0,0	9288,0	235,1	156,8
2019		0,0	7960,8	1037,4	691,6		0,0	9058,7	229,3	152,9
2020		0,0	7497,2	463,6	309,1		0,0	8879,3	179,4	119,6
2021		0,0	7060,6	436,6	291,1		0,0	8703,5	175,8	117,2
2022		0,0	6649,4	411,2	274,1		0,0	8531,2	172,3	114,9
2023		0,0	6262,2	387,2	258,2		0,0	8362,2	168,9	112,6
2024		0,0	5897,5	364,7	243,1		0,0	8196,6	165,6	110,4

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2025		0,0	5554,1	343,4	229,0		0,0	8034,3	162,3	108,2
2026		0,0	5230,6	323,4	215,6		0,0	7875,2	159,1	106,1
2027		0,0	4926,0	304,6	203,1		0,0	7719,3	155,9	104,0
2028		0,0	4639,1	286,9	191,2		0,0	7566,5	152,9	101,9
2029		0,0	4369,0	270,2	180,1		0,0	7416,6	149,8	99,9
2030		0,0	4114,5	254,4	169,6		0,0	7269,8	146,9	97,9
2031		0,0	3874,9	239,6	159,7		0,0	7125,8	144,0	96,0
2032		0,0	3649,3	225,7	150,4		0,0	6984,7	141,1	94,1
2033		0,0	3436,8	212,5	141,7		0,0	6846,4	138,3	92,2
2034		0,0	3236,6	200,1	133,4		0,0	6710,8	135,6	90,4
2035		0,0	3048,1	188,5	125,7		0,0	6578,0	132,9	88,6
2036		0,0	2870,6	177,5	118,3		0,0	6447,7	130,3	86,8
2037		0,0	2703,4	167,2	111,4		0,0	6320,0	127,7	85,1
2038		0,0	2546,0	157,4	105,0		0,0	6194,9	125,1	83,4
2039		0,0	2397,7	148,3	98,8		0,0	6072,2	122,7	81,8
2040		0,0	2258,1	139,6	93,1		0,0	5952,0	120,2	80,2
2041		0,0	2126,6	131,5	87,7		0,0	5834,1	117,9	78,6
2042		0,0	2002,8	123,8	82,6		0,0	5718,6	115,5	77,0
2043		0,0	1886,1	116,6	77,8		0,0	5605,4	113,2	75,5
2044		0,0	1776,3	109,8	73,2		0,0	5494,4	111,0	74,0
2045		0,0	1672,8	103,4	69,0		0,0	5385,6	108,8	72,5
2046		0,0	1575,4	97,4	64,9		0,0	5278,9	106,6	71,1
2047		0,0	1483,7	91,7	61,2		0,0	5174,4	104,5	69,7
2048		0,0	1397,3	86,4	57,6		0,0	5071,9	102,5	68,3

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”



Año	Residuos de alimentos					Madera y similares				
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2049		0,0	1315,9	81,4	54,2		0,0	4971,5	100,4	67,0
2050		0,0	1239,3	76,6	51,1		0,0	4873,1	98,4	65,6
2051		0,0	1167,1	72,2	48,1		0,0	4776,6	96,5	64,3
2052		0,0	1099,1	68,0	45,3		0,0	4682,0	94,6	63,1
2053		0,0	1035,1	64,0	42,7		0,0	4589,3	92,7	61,8
2054		0,0	974,8	60,3	40,2		0,0	4498,4	90,9	60,6
2055		0,0	918,1	56,8	37,8		0,0	4409,3	89,1	59,4
2056		0,0	864,6	53,5	35,6		0,0	4322,0	87,3	58,2
2057		0,0	814,3	50,4	33,6		0,0	4236,4	85,6	57,1
2058		0,0	766,8	47,4	31,6		0,0	4152,6	83,9	55,9
2059		0,0	722,2	44,7	29,8		0,0	4070,3	82,2	54,8
2060		0,0	680,1	42,1	28,0		0,0	3989,7	80,6	53,7

	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
Año	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2001	801	76,1	76,1	0,0	0,0	3.136	260,7	260,7	0,0	0,0
2002	820	77,9	146,8	7,2	4,8	3.435	285,6	502,2	44,0	29,3
2003	770	73,2	206,0	14,0	9,3	3.180	264,3	681,7	84,8	56,5
2004	771	73,2	259,6	19,6	13,1	2.467	205,1	771,7	115,1	76,8
2005	773	73,4	308,4	24,7	16,5	2.957	245,8	887,2	130,3	86,9
2006	838	79,6	358,6	29,3	19,6	3.693	307,0	1044,3	149,8	99,9
2007	872	82,9	407,3	34,1	22,7	4.648	386,4	1254,3	176,4	117,6
2008	1.308	124,3	492,9	38,8	25,8	4.675	388,6	1431,1	211,9	141,2
2009	1.317	125,1	571,1	46,9	31,3	4.222	351,0	1540,4	241,7	161,1
2010	1.142	108,5	625,2	54,3	36,2	4.647	386,3	1666,5	260,2	173,4
2011	1.087	103,3	669,0	59,5	39,7	5.512	458,1	1843,2	281,5	187,6
2012	1.487	141,3	746,6	63,7	42,4	5.192	431,6	1963,5	311,3	207,5
2013	1.817	172,6	848,1	71,0	47,4	4.569	379,8	2011,7	331,6	221,1
2014	1.522	144,6	912,0	80,7	53,8	4.517	375,4	2047,4	339,8	226,5
2015	4.582	435,3	1260,6	86,8	57,9	4.607	382,9	2084,5	345,8	230,5
2016	1.521	144,5	1285,1	120,0	80,0	4.424	367,7	2100,2	352,1	234,7
2017		0,0	1192,3	92,9	61,9		0,0	1858,0	242,1	161,4
2018		0,0	1106,1	86,1	57,4		0,0	1643,8	214,2	142,8
2019		0,0	1026,2	79,9	53,3		0,0	1454,3	189,5	126,3
2020		0,0	976,2	50,0	33,4		0,0	1369,6	84,7	56,5
2021		0,0	928,5	47,6	31,7		0,0	1289,8	79,8	53,2
2022		0,0	883,3	45,3	30,2		0,0	1214,7	75,1	50,1
2023		0,0	840,2	43,1	28,7		0,0	1144,0	70,7	47,2
2024		0,0	799,2	41,0	27,3		0,0	1077,4	66,6	44,4

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2025		0,0	760,2	39,0	26,0		0,0	1014,6	62,7	41,8
2026		0,0	723,2	37,1	24,7		0,0	955,5	59,1	39,4
2027		0,0	687,9	35,3	23,5		0,0	899,9	55,6	37,1
2028		0,0	654,3	33,5	22,4		0,0	847,5	52,4	34,9
2029		0,0	622,4	31,9	21,3		0,0	798,1	49,4	32,9
2030		0,0	592,1	30,4	20,2		0,0	751,7	46,5	31,0
2031		0,0	563,2	28,9	19,3		0,0	707,9	43,8	29,2
2032		0,0	535,7	27,5	18,3		0,0	666,7	41,2	27,5
2033		0,0	509,6	26,1	17,4		0,0	627,8	38,8	25,9
2034		0,0	484,7	24,9	16,6		0,0	591,3	36,6	24,4
2035		0,0	461,1	23,6	15,8		0,0	556,8	34,4	23,0
2036		0,0	438,6	22,5	15,0		0,0	524,4	32,4	21,6
2037		0,0	417,2	21,4	14,3		0,0	493,9	30,5	20,4
2038		0,0	396,9	20,3	13,6		0,0	465,1	28,8	19,2
2039		0,0	377,5	19,4	12,9		0,0	438,0	27,1	18,1
2040		0,0	359,1	18,4	12,3		0,0	412,5	25,5	17,0
2041		0,0	341,6	17,5	11,7		0,0	388,5	24,0	16,0
2042		0,0	324,9	16,7	11,1		0,0	365,9	22,6	15,1
2043		0,0	309,1	15,8	10,6		0,0	344,6	21,3	14,2
2044		0,0	294,0	15,1	10,0		0,0	324,5	20,1	13,4
2045		0,0	279,7	14,3	9,6		0,0	305,6	18,9	12,6
2046		0,0	266,0	13,6	9,1		0,0	287,8	17,8	11,9
2047		0,0	253,1	13,0	8,6		0,0	271,0	16,8	11,2
2048		0,0	240,7	12,3	8,2		0,0	255,3	15,8	10,5

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG “Estimación del potencial de biogás en un vertedero de residuos no peligrosos para su aprovechamiento”

Año	Otros putrescibles orgánicos					Lodos EDAR				
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$B = A + (BT-1 * exp1)$	$C = BT-1 * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2049		0,0	229,0	11,7	7,8		0,0	240,4	14,9	9,9
2050		0,0	217,8	11,2	7,4		0,0	226,4	14,0	9,3
2051		0,0	207,2	10,6	7,1		0,0	213,2	13,2	8,8
2052		0,0	197,1	10,1	6,7		0,0	200,8	12,4	8,3
2053		0,0	187,5	9,6	6,4		0,0	189,1	11,7	7,8
2054		0,0	178,3	9,1	6,1		0,0	178,1	11,0	7,3
2055		0,0	169,6	8,7	5,8		0,0	167,7	10,4	6,9
2056		0,0	161,4	8,3	5,5		0,0	157,9	9,8	6,5
2057		0,0	153,5	7,9	5,2		0,0	148,8	9,2	6,1
2058		0,0	146,0	7,5	5,0		0,0	140,1	8,7	5,8
2059		0,0	138,9	7,1	4,7		0,0	131,9	8,2	5,4
2060		0,0	132,1	6,8	4,5		0,0	124,2	7,7	5,1

## ANEJO G. ESPECIFICACIONES MICROTURBINA C30 (CAPSTONE)



**Microturbina C30 (fuente: Capstone 2020)**

**Clasificación:** 30 kw

**Eficiencia combinada de calor y energía:** hasta 90%

**Voltaje:** 400-480 VAC

**Frecuencia:** 50/60 Hz, Conexión a red: 10-60 Hz, Independiente

**Servicio eléctrico:** trifásico, 4 hilos

**Eficiencia eléctrica LHV:** 26.00%

**Ancho:** 0,76 m

**Profundidad:** 1,5 m

**Altura:** 1,8 m

**Peso:** Conexión a la red: 405 kg; Modo dual: 578 kg

**Velocidad de calor neto LHV:** 13.8 MJ / kWh

**Temperatura de escape:** 275°C

**Flujo de gases de escape:** 0,31 kg / s

**Combustibles compatibles:** gas natural, combustibles líquidos (queroseno, combustibles de aviación, diésel ultra bajo en azufre # 2), biogás (vertedero, digestor), gas asociado, gas agrio, gas propano

## ANEXO H. ESPECIFICACIONES MICROTURBINA C65 (CAPSTONE)



**Microturbina C65 (fuente:Capstone 2020)**

**Clasificación:** 65 kW

**Eficiencia eléctrica LHV:** 29%

**Eficiencia combinada de calor y energía:** Hasta 90%

**Voltaje:** 400-480 VAC

**Frecuencia:** 50/60 Hz.

**Servicio eléctrico:** trifásico, 4 hilos Wye

**Ancho:** 0,76 m

**Profundidad:** 1.95 m

**Altura:** 1,91 m

**Peso:** Conexión a la red: 758 kg; Modo dual: 1.121 kg

**Velocidad de calor neto LHV:** 12.4 MJ / kWh

**Temperatura de escape:** 309°C

**Flujo de gases de escape:** 0,49 kg / s

**Combustibles compatibles:** gas natural, combustibles líquidos (queroseno, combustibles de aviación, diésel ultra bajo en azufre # 2), biogás (vertedero, digestor), gas asociado, gas agrio, gas propano